



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE  
TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL ELÉCTRICO

Título del proyecto:

PROTECCIÓN CATÓDICA CONTRA LA CORROSIÓN DEL GASODUCTO  
LUMBIER – BERIAIN - URROZ

TOMO 1 / 2

Alumno: Carlos Ramírez Ballabriga

Tutor: Marta Benito Amurrio

Pamplona, septiembre 2014

## INDICE

DOCUMENTO 1 . MEMORIA DESCRIPTIVA .....	3
DOCUMENTO 2 . CALCULOS .....	88
DOCUMENTO 3. PLANOS .....	107
DOCUMENTO 4. PLIEGO DE CONDICIONES .....	112
DOCUMENTO 5. PRESUPUESTO .....	150
DOCUMENTO 6. BIBLIOGRAFÍA .....	158

## **DOCUMENTO I . MEMORIA DESCRIPTIVA**

## INDICE DEL DOCUMENTO 1 . MEMORIA DESCRIPTIVA

1.1. OBJETO DEL PROYECTO .....	5
1.2. NORMATIVA APLICABLE .....	7
1.3. DESCRIPCIÓN DEL TRAZADO DEL GASODUCTO .....	9
1.4. CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA .....	9
1.5. TOMA DE DATOS EN CAMPO. ....	10
1.6. EQUIPOS A INSTALAR .....	17
1.7. UBICACIÓN DE EQUIPOS .....	21
1.8. ANEXOS	
1.8.1. PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DE TUBERÍAS METÁLICAS ENTERRADAS .....	24.
1.8.2. CORRIENTES VAGABUNDAS .....	59
1.8.3. ALTERNATIVAS AL PROYECTO .....	81



## 1.1 OBJETO DEL PROYECTO

El presente proyecto tiene por objeto determinar el sistema de protección a emplear para evitar la corrosión del gasoducto de acero al carbono que se va a construir entre los términos municipales de Lumbier y Ezperun y los ramales a Beriain y Urroz.

Este gasoducto se construye para asegurar la presión del suministro de gas natural a Pamplona en sus entradas Sur y Este. Parte aguas abajo de la Estación de Compresión de gas natural ubicada en el Término Municipal de Lumbier, de forma que el gasoducto se aprovisionará a mayor presión que la actual y paliará la bajada de presión del gasoducto Sansoain-Pamplona cuando opera la Estación de Compresión.

En este documento se muestran los criterios, cálculos y materiales que se consideran más adecuados para la correcta protección de la conducción contra la corrosión. Para ello se han efectuado las medidas en campo necesarias para analizar los diferentes terrenos por los que discurrirá el gasoducto, la agresividad de aquellos, el dimensionado y mejor ubicación de los equipos necesarios y prever posibles interferencias con otros servicios.

El sistema de protección definitivo será el de protección catódica por corriente impresa, pero durante la construcción del gasoducto los tramos de tubería enterrados estarán protegidos provisionalmente mediante la colocación de ánodos de sacrificio de magnesio.

### PROTECCIÓN CATÓDICA CONTRA LA CORROSIÓN DE TUBERÍAS DE ACERO ENTERRADAS

En el ANEXO 1.8.1 se describe la base teórica de los métodos que se emplean para la protección de las tuberías de acero enterradas frente a la corrosión.

Como introducción se expone brevemente el sistema a diseñar para el presente Proyecto:

La corrosión que sufre una conducción metálica enterrada se debe a la formación de pilas galvánicas en su superficie debido a que unas zonas de la tubería actúan como ánodo, otras como cátodo y el terreno circundante es el electrolito. Las zonas anódicas experimentan una pérdida de electrones que circulan por el terreno hasta las zonas catódicas. Las primeras reaccionan con el medio acuoso y se produce la corrosión.

Es importante conseguir evitar el contacto del metal con el terreno, para lo cual se reviste la tubería con un material aislante. A pesar de las buenas propiedades aislantes y durabilidad de los actuales revestimientos no es posible conseguir el aislamiento total y definitivo del metal con el electrolito. Se presentan poros, grietas, impactos durante la construcción del ducto o punzamientos por piedras que hacen que haya zonas de metal al descubierto. Estas zonas se convierten en anódicas, con la consiguiente y rápida pérdida de material por corrosión.

Un método eficaz y económico para evitar la corrosión de éstos conductos es la protección catódica. En resumen se trata de conseguir que la totalidad de la superficie metálica enterrada se convierta en cátodo frente a un lecho anódico que se instala para que sea éste el que se corra.

En tramos cortos de tuberías y que no se vean afectados por influencias por corrientes vagabundas un método de protección catódica eficaz es la instalación de ánodos de sacrificio, de magnesio o zinc, conectados a la tubería y enterrados en su proximidad. Estos ánodos se van destruyendo a medida que suministran a la tubería metálica la corriente eléctrica que evita su corrosión. En el caso del gasoducto que nos

ocupa, se instalarán ánodos de magnesio provisionales a medida que se van enterrando tramos de tubería, para su protección durante la obra. Una vez finalizada esta se desconectarán y aislarán los extremos de los cables para evitar que se conviertan en consumidores de corriente eléctrica. También se emplearán ánodos de zinc para la protección de los tramos de tubería enterrada en la futura Posición de Ezperun, que a su vez cumplirán con la función de tomas de tierra del sistema mecánico.

Cómo método definitivo de protección del gasoducto se dotará a este de un suministro de corriente continua desde unas fuentes de alimentación externa, con el polo negativo conectado al tubo y el positivo a unos lechos anódicos enterrados a una distancia conveniente. A este método de protección catódica se le denomina “corriente impuesta”. La corriente circulará desde los lechos anódicos a la tubería a través del terreno ( electrolito ), aportando en la superficie del metal de la tubería suficiente concentración de electrones como para convertirla en cátodo y de esta forma protegerla contra la corrosión.

Se va a utilizar este método por considerar probada su eficacia y economía. Para su implantación es necesario básicamente tener en cuenta las características del terreno que se va a atravesar y la superficie de estructura metálica que se va a proteger

## 1.2. NORMATIVA APLICABLE

- Real Decreto 1627/97, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción.
- Real Decreto 773/97, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.
- Real Decreto 486/97, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión aprobado por Real Decreto 842/2002 e Instrucciones Técnicas Complementarias BT01 a BT51 de 2002.
- UNE-EN-9001-(2008). Requisitos de los Sistemas de Calidad
- UNE-EN-12068. Protección Catódica. Recubrimientos orgánicos exteriores para la protección contra la corrosión de tubos de acero enterrados o sumergidos, empleados en conjunción con la Protección Catódica. Cintas y materiales retráctiles.
- UNE-EN-12954. Protección Catódica de estructuras metálicas enterradas o sumergidas. Principios generales y aplicación para tuberías.
- UNE-EN-13509. Técnicas de medida en Protección Catódica.
- UNE-EN-50162. Protección contra la corrosión debida a corrientes vagabundas provenientes de sistemas de corriente continua.
- UNE-EN-50122. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Parte 2: medidas de protección contra los efectos de las corrientes vagabundas producidas por los sistemas de tracción de corriente continua.
- CEOCOR. Guidelines for risk assessment and mitigation measures in a.c. corrosión on cathodically protected pipelines.
- NACE Standard RP0169. Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems.
- NACE Standard RP0286. Electrical isolation of cathodically protected pipelines.
- Documento TM0497 de NACE. Measurement techniques related criteria for Cathodic Protection on underground or submerged metallic piping systems.
- Documento 04045 de NACE. Cathodic Protection current requirements for electrical grounding materials.

- Documento 24207 de NACE. Coatings used in conjunction with Cathodic Protection.
- Instrucciones técnicas de los fabricantes sobre montaje, manipulación, almacenamiento, transporte, ensayos y puesta en servicio aplicables a los equipos a instalar.
- Especificaciones de la empresa propietaria del gasoducto:
  - EE-012. Influencias eléctricas de corriente alterna en tuberías enterradas
  - EE-109. Bases generales de diseño y ejecución de los sistemas eléctricos en posiciones de válvula telemandada.
  - EO-201. Movimientos de tierra. Relleno.
  - EV-121. Juntas aislantes tipo monoblock.
  - EV-201. Revestimiento de componentes de tubería en obra.

### 1.3. DESCRIPCIÓN DEL TRAZADO DEL GASODUCTO

El gasoducto tendrá su origen en la Estación de Compresión de gas natural situada en el Término Municipal de Lumbier y discurrirá en sentido Este-Oeste hasta llegar a la nueva Posición de Ezperun, situada a 23,66 km del origen, donde habrá válvulas de seccionamiento del gasoducto y trampas de rascadores. Desde esta Posición partirán dos ramales, uno de 8,51 Km para conectar en la Posición de Beriain con el gasoducto existente Calahorra - Pamplona y el otro, de 11,35 km, para conectar con el gasoducto Sansoain - Pamplona en la nueva Posición a construir en Urroz.

### 1.4. CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA

La tubería será de acero al carbono, norma API 5L, grado X-60 y su profundidad de enterramiento será de 1 metro aproximadamente.

Las características de los diferentes tramos de tubería son las siguientes:

TRAMO	Diámetro ( " )	Longitud ( m )	Espesor ( mm )
Lumbier - Ezperun	20	23.656	7,1
Ezperun - Beriain	14	8.507	6,4
Ezperun - Urroz	14	11.346	6,4

#### 1.4.1 REVESTIMIENTO EXTERNO DE LA TUBERÍA

El revestimiento exterior de la tubería será de polietileno tricapa de alta calidad, de 2,5 mm de espesor, aplicado en fábrica por el método de extrusión lateral. Ha de pasar satisfactoriamente los siguientes ensayos:

- Adherencias
- Respuesta catódica
- Despegado por formación de hidrógeno

Los tubos tendrán una longitud de 12 m y sus extremos estarán libres de revestimiento en una longitud de 15 cm para realizar la soldadura de unión entre tubos.

Para el revestimiento de los tramos desnudos para la unión soldada se emplearán varias capas de encintado autoadhesivo de polietileno según procedimiento del fabricante y se pasará el equipo de comprobación de revestimiento ( chispómetro ).

## 1.5. TOMA DE DATOS EN CAMPO

Para poder realizar el Proyecto se han realizado los siguientes trabajos en campo para la toma de datos necesarios para la realización del Proyecto:

- Aproximadamente cada 1.000 m se han tomado las resistividades de los distintos terrenos por los que discurre el trazado del gasoducto para determinar su agresividad.
- Se han comprobado las afecciones con otras instalaciones que pueden influir en el gasoducto o pueden verse perjudicadas por el sistema de protección catódica que en este documento se proyecta. Esto se ha realizado en varios cruces con líneas eléctricas aéreas de alta tensión y un cruce con ferrocarril electrificado. Se ha procurado que el trazado de la tubería no discurra próximo a una línea eléctrica aérea de alta tensión ni de estaciones de distribución eléctrica. Se considera que las líneas eléctricas de voltaje inferior a 15 Kv no producen afección apreciable por conducción, por lo que basta con dejar una separación mínima de 10 m entre el tubo y la línea eléctrica. Cuando se ha tenido que realizar cruces con líneas, estos han proyectado para que la traza del gasoducto pase por el centro del vano de la línea, con un ángulo lo más cercano a 90º para mantener la tubería lo más alejada posible, y sin cambios bruscos en el trazado para conseguir dicho ángulo. Existe un cruce con un gasoducto de distribución de gas natural a la localidad de Beriain, pero esta conducción es de polietileno, no metálica, por lo que no existe afección a efectos de corrosión.
- Determinar los lugares idóneos para la ubicación de los distintos equipos que formarán el sistema, atendiendo a factores como la facilidad de acceso, disponibilidad de alimentación eléctrica o reducir al mínimo la afección a propietarios de fincas.

### 1.5.1 MEDIDA DE RESISTIVIDADES DEL TERRENO

Se define la resistividad como la inversa de la conductividad, es decir, cuanto menor sea la resistividad de un terreno, mejor conductor de la corriente eléctrica es.

Se mide en ohmios x metro ( $\Omega\text{m}$ ) u ohmios x centímetro ( $\Omega\text{cm}$ ) y es la principal característica de un electrólito. Depende de la composición química, la concentración de iones y la temperatura del suelo. Cuanto mayor sea el grado de humedad y el contenido de sales solubles, menor es la resistividad de un terreno.

La resistividad es el dato más relevante para conocer la agresividad de un suelo, ya que aunque en la formación de pilas de corrosión influyen factores tales como la aireación, humedad, salinidad,... la intensidad de la corriente será mayor cuanto menor sea la resistividad.

Cuando se va a instalar una conducción de gran longitud, como un gasoducto, oleoducto,... nos encontramos con que va a atravesar terrenos de composición muy diferente y por tanto grandes variaciones de la resistividad. Esto hace que aparezcan pilas geológicas al pasar de un terreno a otro, que son susceptibles de producir corrosión.

El cálculo de las resistividades de los diferentes terrenos en los que va a estar enterrada la tubería tiene tres objetivos: conocer el grado de agresividad del terreno y así detectar las zonas con mayor necesidad de protección catódica, determinar los lugares idóneos para el emplazamiento de los lechos anódicos y calcular la influencia que otros servicios pueden tener sobre el tubo que hemos de proteger.

Tal como se ha expuesto en el punto anterior, se han calculado las resistividades a lo largo de todo el trazado partiendo de las mediciones de resistencia realizadas cada 1.000 m y a dos profundidades en cada punto. Estas profundidades han sido 1 y 2 m.

Los puntos de toma de medida figuran en los planos a escala 1:5000. Asimismo se adjunta una tabla en la que se ven los datos de resistividad en cada punto de medida, las coordenadas UTM para posible comprobación y un gráfico en el que puede apreciarse el grado de agresividad del suelo en cada punto.

La resistencia del terreno, previa al cálculo de la resistividad, se midió según el método Wenner o de cuatro picas. Para su aplicación se clavan en el suelo cuatro electrodos metálicos, alineados y equidistantes. Se inyecta corriente eléctrica a través de las dos picas extremas a una frecuencia especial para evitar interferencias de otras corrientes. Esto establece un campo eléctrico en el terreno que las separa y podemos medir una diferencia de potencial entre los dos electrodos centrales. Obtenemos el valor de la resistencia del suelo como cociente de la diferencia de potencial medida y la intensidad que circula.

Para el cálculo de la resistividad, una vez medida la resistencia del terreno, se aplica la fórmula

$$\rho = 2 \pi a R$$

siendo  $\rho$ : la resistividad en  $\Omega \times m$   
 $a$ : la distancia entre picas de tierra  
 $R$ : resistencia del terreno

La separación entre picas (  $a$  ) determina la profundidad de la toma de resistividad según una relación  $\frac{3}{4}$ , de forma que para una profundidad de 1 m ( profundidad mínima de enterramiento de la tubería ) la separación ha sido de 1,3 m

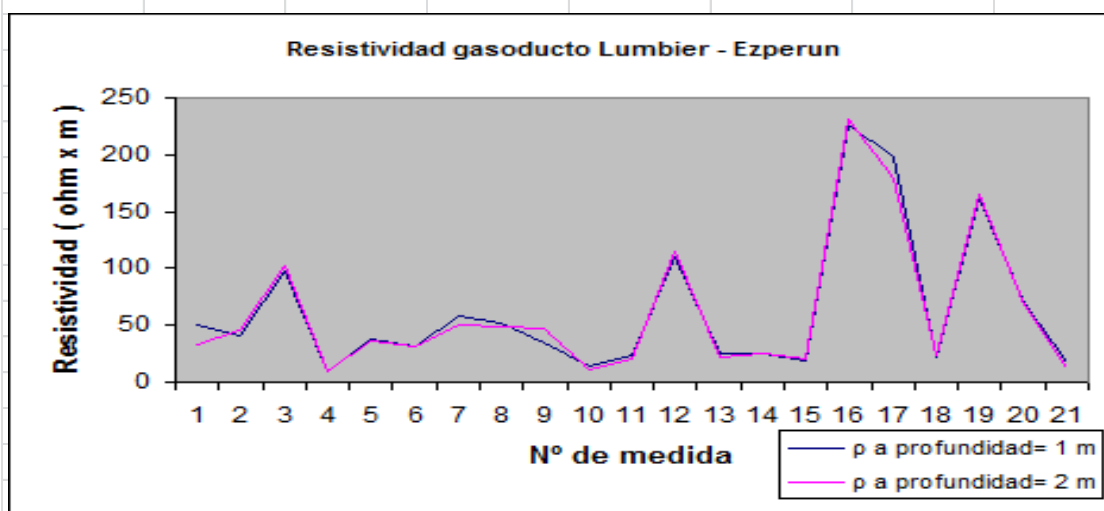
La tabla que relaciona la resistividad de un terreno y su agresividad por corrosión, universalmente empleada, es la siguiente:

Resistividad del suelo ( $\Omega \times m$ )	Agresividad del suelo
Hasta 5	Fuertemente agresivo
Entre 5 y 20	Muy agresivo
Entre 20 y 100	Normalmente agresivo
Superior a 100	Moderadamente agresivo

## 1.5.2 TOMA DE RESISTIVIDADES A LO LARGO DE LA TRAZA DEL GASODUCTO

A continuación se muestran las hojas de cálculo con las resistividades a lo largo del gasoducto.

GASODUCTO LUMBIER - EZPERUN							
CALCULO DE RESISTIVIDADES							
Nº medida	Distancias en m		Resistencia		Resistividad en $\Omega \times m$		Agresividad del terreno
	Al origen	Parciales	Prof. 1 m	Prof. 2 m	Prof. 1 m	Prof. 2 m	
1	1.238		6,2	2,02	50,62	32,98	NA
2	2.652	1.414	5,01	2,76	40,9	45,07	NA
3	3.696	1.044	12,01	6,22	98,05	101,56	NA
4	4.736	1.040	1,19	0,55	9,72	8,98	MA
5	5.833	1.097	4,55	2,24	37,15	36,57	NA
6	7.348	1.515	3,88	1,88	31,68	30,7	NA
7	8.552	1.204	7,15	3,04	58,37	49,64	NA
8	9.637	1.085	6,38	2,98	52,09	48,66	NA
9	10.640	1.003	4,18	2,92	34,13	47,68	NA
10	11.697	1.057	1,75	0,72	14,29	11,76	MA
11	12.820	1.123	2,98	1,27	24,33	20,74	NA
12	14.136	1.316	13,54	6,99	110,54	114,13	PA
13	14.850	714	3,11	1,33	25,39	21,72	NA
14	15.857	1.007	3,12	1,53	25,47	24,98	NA
15	16.963	1.106	2,39	1,26	19,51	20,57	MA
16	18.039	1.076	27,66	14,13	225,82	230,71	PA
17	19.044	1.005	24,31	10,99	198,47	179,44	PA
18	20.153	1.109	2,78	1,42	22,7	23,19	NA
19	21.277	1.124	19,87	10,12	162,22	165,24	PA
20	22.383	1.106	8,38	4,16	68,41	67,92	NA
21	23.445	1.177	2,05	0,81	16,74	13,23	MA

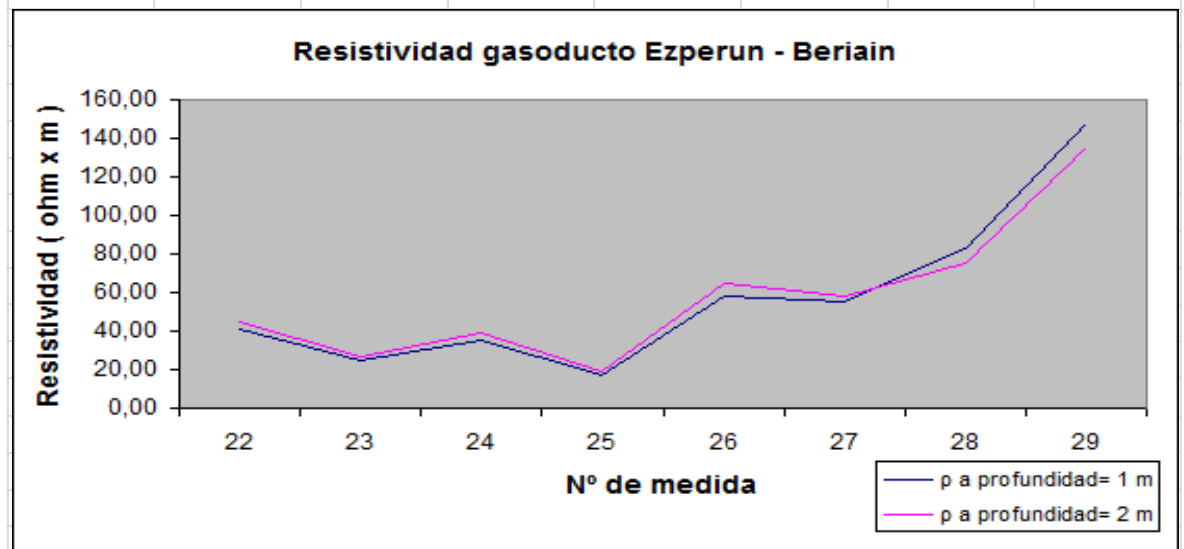


NIVELES DE AGRESIVIDAD DEL TERRENO:

FA	Fuertemente agresivo
MA	Muy agresivo
NA	Normalmente agresivo
PA	Poco agresivo

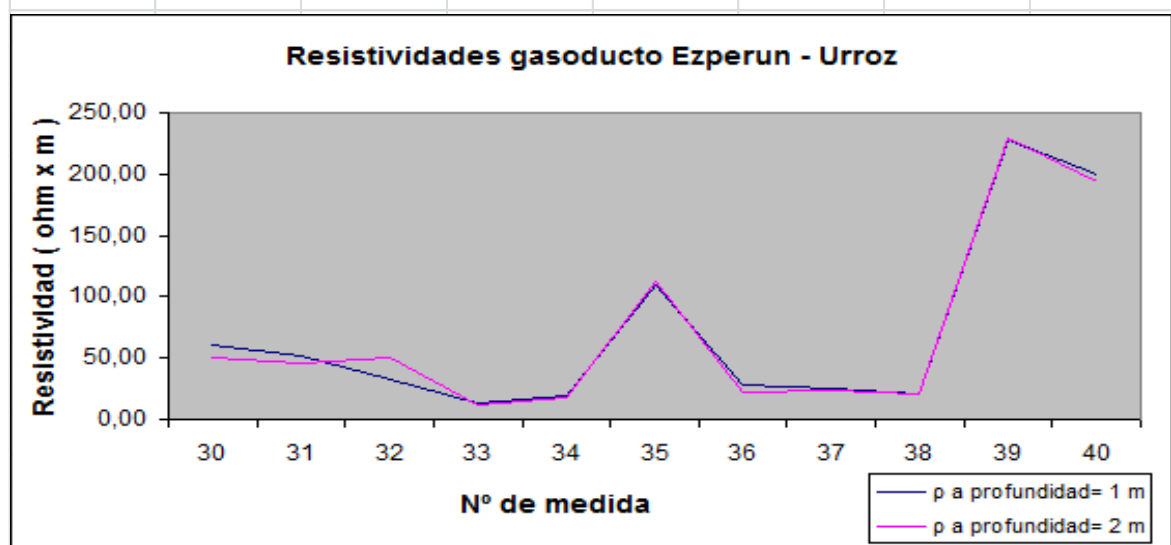


GASODUCTO EZPERUN - BERIAIN							
CALCULO DE RESISTIVIDADES							
Nº	Distancias en m		Resistencia		Resistividad en $\Omega \times m$		Agresividad del terreno
medida	Al origen	Parciales	Prof: 1 m	Prof: 2 m	Prof: 1 m	Prof: 2 m	
22	1048		5,07	2,72	41,39	44,41	NA
23	2050	1.002	3,01	1,63	24,57	26,61	NA
24	3083	1.033	4,31	2,39	35,19	39,02	NA
25	4171	1.088	2,06	1,19	16,82	19,43	MA
26	5077	906	7,14	3,97	58,29	64,82	NA
27	6398	1.321	6,79	3,58	55,43	58,45	NA
28	7433	1.035	10,14	4,62	82,78	75,44	NA
29	8514	1.081	18,09	8,28	147,69	135,2	PA



NIVELES DE AGRESIVIDAD DEL TERRENO:							
				FA	Fuertemente agresivo		
				MA	Muy agresivo		
				NA	Normalmente agresivo		
				PA	Poco agresivo		

GASODUCTO EZPERUN - URROZ							
CALCULO DE RESISTIVIDADES							
Nº	Distancias en m		Resistencia		Resistividad en $\Omega \times m$		Agresividad del terreno
medida	Al origen	Parciales	Prof: 1 m	Prof: 2 m	Prof: 1 m	Prof: 2 m	
30	1047		7,47	3,04	60,99	49,64	NA
31	2094	1.047	6,29	2,84	51,35	46,37	NA
32	3050	956	4,01	3,05	32,74	49,8	NA
33	4094	1.044	1,63	0,73	13,31	11,92	MA
34	5068	974	2,44	1,1	19,92	17,96	MA
35	6143	1.075	13,44	6,93	109,72	113,15	PA
36	7165	1.022	3,42	1,33	27,92	21,72	NA
37	8244	1.079	3,15	1,46	25,72	23,84	NA
38	9278	1.034	2,46	1,28	20,08	20,9	NA
39	10300	1.022	27,89	14,07	227,69	229,73	PA
40	11350	1.050	24,39	11,85	199,12	193,49	PA



NIVELES DE AGRESIVIDAD DEL TERRENO:

FA	Fuertemente agresivo
MA	Muy agresivo
NA	Normalmente agresivo
PA	Poco agresivo

Analizando las medidas de resistividades obtenidas la conclusión es que no nos enfrentamos a suelos especialmente agresivos.

### 1.5.3 INFLUENCIAS EXTERNAS

A continuación se relacionan los servicios que pueden afectar al gasoducto a lo largo de su recorrido.

Existen varios cruces con líneas eléctricas y un cruce con el ferrocarril Castejón - Alsasua.

#### CRUCES CON LINEAS ELECTRICAS DE ALTA TENSION

Las líneas eléctricas que pueden afectar a la tubería son las de un voltaje superior a los 15 kV.

A continuación se muestra una relación de las líneas posiblemente afectantes, en la que se detallan las resistividades del terreno existente entre el apoyo eléctrico y el gasoducto, la distancia de dicho apoyo a la tubería y el resto de datos necesarios para el cálculo del riesgo y concluir si es necesario tomar medidas adicionales para evitar la posible influencia de la línea.

Relación de cruces con líneas eléctricas:

Referencia	Nº plano	PK del gasoducto	Distancia Apoyo-tubo	Tensión ( kV )	Resistividad ( $\Omega$ x m )	Nº Circuitos	Cable de guarda
Cruce AT1	L-02	2.333	122 / 277 m	66	42	2	NO
Cruce AT2	L-12	1.095	62 / 89 m	30	39,8	1	NO
Cruce AT3	L-13	5.698	68 / 112 m	30	62	1	NO
Cruce AT4	L-13	6.054	28 / 111 m	30	58,3	1	NO
Cruce AT5	L-13	6.073	35 / 110 m	66	56,54	1	NO
Cruce AT6	L-11	1.190	35 / 135 m	30	51,15	1	NO
Cruce AT7	L-16	3.864	64 / 63 m	30	13,65	2	NO

El criterio para medición de las resistividades se muestra en el dibujo nº 1 del punto 1.8.1.7. del ANEXO 1.8.1., en el que se especifica el nº de medidas de resistencia de tierra a realizar teniendo en cuenta las características de la línea eléctrica y la distancia al gasoducto.

En el DOCUMENTO II. CALCULOS se calcula la influencia que pueden provocar las líneas eléctricas del presente proyecto.

## CRUCE CON LINEA FERREA ELECTRIFICADA

El punto más crítico en el que el gasoducto puede sufrir el efecto de corrientes vagabundas es el punto kilométrico 5,1 del Ramal Ezperun - Beriain, en el T.M de Oriz, en el que habrá un cruce con el FF.CC. Castejón - Alsasua. El gasoducto pasará por el interior de una vaina de acero ( tubo concéntrico de perforación y protección ).

Según la información facilitada por la empresa ADIF, la línea férrea está alimentada con 3 kV de corriente continua, estando conectado el polo negativo a la vía y el positivo a la catenaria.

Se instalarán juntas aislantes tanto aguas arriba como aguas abajo del cruce para poder aislar ese tramo y adoptar medidas para evitar la influencia del ferrocarril sobre la tubería.

Dado que las condiciones del campo eléctrico producido sobre el terreno por el ferrocarril pueden cambiar sustancialmente, el método para determinar las variaciones en el potencial de la tubería consistirá, una vez enterrada esta y con el sistema de protección catódica en funcionamiento, en realizar registros de 24 horas.

Además existe un cruce con el Canal de Navarra que aunque no suponga una afección por perturbaciones eléctricas obliga a realizar el paso del gasoducto por dentro de una vaina de acero ( igual que en el cruce con el ferrocarril ).

Las vainas son un punto de peligro porque pueden producirse derivaciones eléctricas no deseadas entre la vaina y el gasoducto y porque son un punto de posible corrosión si no se realiza la obra civil con mucha calidad.

## 1.6. EQUIPOS A INSTALAR

Los equipos y aparatos fundamentales que compondrán el sistema de protección catódica serán:

- ESTACIONES DE PROTECCIÓN CATÓDICA ( EPC ). Su función es la de suministrar la corriente eléctrica continua que protegerá a la estructura metálica frente a la corrosión. Su alimentación eléctrica será de 220 V monofásica de corriente alterna. La EPC transformará y rectificará la corriente para inyectar al lecho anódico la intensidad requerida, en corriente continua.
- LECHOS DE ÁNODOS. Se instalará un lecho de ánodos con cada EPC. El lecho de ánodos será el polo positivo de la pila constituida por la tubería, el terreno y el propio lecho. A través de los lechos se inyectará la corriente de protección al terreno. También se les denomina lechos dispersores. Los ánodos se unen entre sí mediante un conductor que a su vez se conecta al polo positivo de la Estación de Protección Catódica.

Estos ánodos se van a sacrificar para proteger a la estructura metálica. A medida que sale de ellos la corriente de protección, se consumen, con una rapidez que es función del tipo de material del que están compuestos.

Los lechos anódicos tienen como función transmitir al suelo la corriente de protección, por lo que cualquier material metálico buen conductor de la corriente eléctrica podría emplearse como ánodo para formar los dispersores de corriente para protección catódica por corriente impuesta, pero por razones económicas y sobre todo por su baja tasa de consumo se utilizarán ánodos de Titanio – Mezcla de Óxidos Metálicos ( Ti / MMO ). La composición del ánodo será una base de Titanio con un revestimiento electrocatalítico a base de mezcla de óxidos depositado sobre su superficie. Las propiedades electroquímicas del revestimiento de los ánodos del lecho les permiten funcionar con una tasa de corrosión inapreciable.

- JUNTAS AISLANTES. Se insertan soldadas en el gasoducto y como su nombre indica crean una discontinuidad eléctrica en este.

Su función es necesaria en los siguientes casos:

- Cuando el tubo discurre por terrenos de muy distinta composición
- En la unión de tuberías de distinto material, para evitar la corrosión debida a pares galvánicos.
- En la unión de tuberías con revestimientos de diferente composición
- Para evitar interferencias con corrientes vagabundas originadas por otros sistemas de protección catódica, ferrocarriles electrificados, instalaciones industriales,...
- Para evitar la conducción de descargas atmosféricas a lo largo de la conducción.
- Para mitigar las influencias de líneas eléctricas de alta tensión que puedan existir en las inmediaciones del conducto.
- Evitar interferencias en la protección catódica debidas a los sistemas de puesta a tierra
- Separar eléctricamente las partes protegidas catódicamente de las aéreas, que pueden estar puestas a tierra.
- Regulación del potencial en tramos contiguos de una conducción.

Lo anteriormente expuesto indica que las juntas aislantes son importantes de cara a la seguridad del personal, la eficacia de la protección catódica y en general la seguridad de las instalaciones.

Se instalarán juntas aislantes tipo monoblock soldadas a la tubería. Se trata de juntas cuyo interior ha sido montado en fábrica y se presentan listas para ser soldadas a la tubería. Se consiguen aislamientos de hasta 20 KV sin que se perfore la junta. El voltaje de prueba será de 15 KV. El hecho de que salgan de fábrica cuando ya se les han realizado los ensayos eléctrico ( rigidez dieléctrica ) y mecánico ( presión ) ofrece una gran garantía. Su montaje en campo se limita a las soldaduras de unión con la tubería y son muy compactas.

En ocasiones interesa que a través de la junta aislante circule una determinada cantidad de corriente eléctrica y para realizar la regulación de esa intensidad se instalan resistencias variables o ajustadas al efecto. Esto puede emplearse para mitigar corrientes parásitas o regular los potenciales de protección catódica. La necesidad de instalación de dichas resistencias se ve tras la puesta en marcha del sistema.

- TOMAS DE POTENCIAL SIMPLES. Dado que la tubería se encuentra enterrada, para poder realizar medidas de su potencial se instalan las denominadas Tomas de Potencial. Se instalan unos conductores que en un extremo se encuentran conectados a la tubería y el otro se encuentra accesible en la superficie, dentro de una caja. Se utiliza para medir el potencial del tubo respecto a un electrodo de referencia portátil. Otra aplicación de las TP es el poder conectar detectores de tubería. Se inyecta una frecuencia determinada a la tubería desde la TP y con el detector se tiene la posibilidad de detectar la ubicación y profundidad de la tubería.

- TOMAS DE POTENCIAL ESPECIALES. Las Tomas de Potencial denominadas Especiales se instalan asociadas a las juntas aislantes ( se instalarán en todos los puntos donde se haya junta aislante ). La caja es más grande que en las Tomas de Potencial Simples dado que en ella se alojan distintos elementos según su función. A dicha caja se llevan al menos tres conductores: uno de cada lado de la junta aislante y otro conductor que se conecta a una pica de tierra.

Sus aplicaciones son las siguientes:

- Medida de los potenciales de protección catódica a uno y otro lado de la junta aislante.
- Control de la protección catódica regulando los potenciales a los lados de la junta aislante mediante resistencia variable o diodo, apertura total para aislar la conducción entre los extremos de la junta, o puente para dar continuidad eléctrica anulando la función aislante de la junta.
- Alojar a los dispositivos de protección frente a descargar eléctricas debidas a instalaciones cercanas o a fenómenos atmosféricos.

Se determina el número de tomas de potencial según las características del trazado, su accesibilidad, la disposición de juntas aislantes, la heterogeneidad de los terrenos, su agresividad y la influencia de otras instalaciones por afección por corrientes vagabundas.

- **ELECTRODOS DE REFERENCIA FIJOS.** Se emplean para poder conocer el potencial de polarización de la tubería. Se entierran a la misma profundidad que esta y a una distancia de 20 cm. La señal del electrodo de referencia asociado a una Estación de Protección Catódica se lleva a esta mediante un conductor para determinar el potencial del gasoducto y se utiliza como consigna para inyectar más o menos intensidad de protección. Se usarán de Cu/SO<sub>4</sub>Cu.

La EPC2 a instalar en la Posición de Ezperun dará protección a dos Tramos de gasoducto distintos, Ezperun – Beriain y Ezperun – Urroz, por lo que se instalará un electrodo de referencia junto a la tubería en cada uno de dichos tramos de gasoducto. En un cuadro eléctrico ( CIPC ) que se describirá más adelante se puede seleccionar la señal de qué electrodo de referencia se envía a la EPC, en función del comportamiento del sistema.

- **PROBETAS .** Incorporan una pieza metálica de material similar al acero con el que está construido el gasoducto. Dicha pieza metálica es de una superficie conocida y se entierra desnuda para que esté en contacto con el terreno y poder controlar la polarización de la tubería comparando con el comportamiento de la probeta. Se emplearán probetas de 10 cm<sup>2</sup> de superficie de acero desnudo.

- **DESCARGADORES DE SOBRETENSIONES.** Se instalarán como protección, tanto de los operarios como de la instalación, ante descargas, fundamentalmente atmosféricas, desviándolas a tierra.

Se instalarán en las cajas de las Tomas de Potencial Especiales y en las Estaciones de Protección Catódica, uno para el conductor anódico y otro para el catódico. Su tensión de cebado máxima es de 250 V, es decir, cuando entre sus dos electrodos se alcanza dicho voltaje, se convierten en conductores.

- **ANODOS DE SACRIFICIO .** En la Posición de válvulas de Ezperun, no habrá continuidad eléctrica con el gasoducto debido a las juntas aislantes. La protección contra la corrosión de la tubería enterrada se realizará con ánodos reactivos. Estos ánodos a su vez serán tomas de tierra local mecánica, independientes de la red de tierras eléctricas de la Posición. Ambas redes de tierra estarán separadas por un descargador ubicado en la sala de control de la Posición, de modo que ante una descarga atmosférica fuerte se unen las citadas redes para poder dispersar mejor la energía.

- **CUADROS CIPC.-** Se instalará un cuadro eléctrico llamado CIPC ( Cuadro de Inyección de Protección Catódica ) junto a cada una de las dos EPC.

En su interior se alojarán bornas a las que se llevan todos los conductores del sistema de protección catódica. Se trata de tener los cables centralizados en un punto para así poder realizar puentes, medidas y registros de forma más cómoda y eficaz.

## LISTADO DE EQUIPOS A INSTALAR

El sistema de Protección Catódica proyectado constará de los siguientes equipos:

- 2 Estaciones de Protección Catódica
- 2 Lechos anódicos
- 3 Electrodo de Referencia fijos
- 9 Tomas de potencial especiales, 8 asociadas a las 8 juntas aislantes a instalar en el gasoducto y 1 en el campo de válvulas de la Posición de Ezperun
- 22 tomas de potencial simples, una de ellas en el cruce con el Canal de Navarra
- 9 Electrodo de referencia enterrados junto a probeta, uno de ellos en el campo de válvulas de la Posición de Ezperun
- 9 Probetas de 10 cm<sup>2</sup>, una de ellas en el campo de válvulas de la Posición de Ezperun
- 6 Anodos reactivos de zinc para la Posición de Ezperun
- 2 Cuadros CIPC



## 1.7. UBICACIÓN DE EQUIPOS

En los trabajos de campo se ha determinado el lugar idóneo para la ubicación de las Estaciones de Protección Catódica ( EPC ) y sus lechos anódicos, accesos para la instalación de tomas de potencial ( TP ) e instalación de juntas aislantes ( JA ) con sus correspondientes Tomas de Potencial Especial ( TPE )

### 1.7.1 JUNTAS AISLANTES

Se instalarán juntas aislantes en las siguientes ubicaciones ( se indica nombre dado a la junta, tamaño y ubicación ):

- JA-1. ( 20 “). Inicio del gasoducto.
- JA-2. ( 20 “). A la entrada de la Posición de Ezperun. Separación de zonas de EPCs.
- JA-3. ( 14 “). Comienzo del tramo Ezperun - Beriain.
- JA-4. ( 14 “). Aguas arriba del cruce con el FF.CC. Castejón - Alsasua.
- JA-5. ( 14 “). Aguas abajo del cruce con el FF.CC. Castejón - Alsasua.
- JA-6. ( 14 “). Final del tramo Ezperun - Beriain, junto a la Posición de Beriain.
- JA-7. ( 14 “). Comienzo del tramo Ezperun - Urroz
- JA-8. ( 14 “). Final del tramo Ezperun - Urroz, junto a la Posición de Urroz.

### 1.7.2. ESTACIONES DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Se instalarán dos Estaciones de Protección Catódica, una al inicio del gasoducto, en la Estación de Compresión de Lumbier y la otra en la Posición de Ezperun.

El suministrar corriente de protección desde dos puntos distintos permitirá una mejor distribución del potencial y asegurar los niveles de potencial en los puntos extremos. Otra ventaja es que en caso de fallo de una de las EPC, la otra pueda aportar intensidad provisionalmente para proteger la zona que cubría la que ha fallado, hasta su reparación. Esto se logra puenteando y en su caso regulando mediante una resistencia, en la junta aislante de separación de las zonas de influencia de ambas EPC, que se ubicará aguas arriba en la entrada del gasoducto a la Posición de Ezperun.

La ubicación de la primera se ha elegido debido a la disponibilidad de alimentación eléctrica, evitar expropiaciones de terreno y el hecho de que en la Estación de Compresión hay presencia de personal técnico que puede supervisar el sistema sin necesidad de desplazamientos.

La segunda EPC se ubicará en la Posición de Ezperun por los mismos motivos de disponibilidad de alimentación eléctrica, evitar expropiación de terreno y porque se encuentra centrada entre los ramales Ezperun - Beriain y Ezperun - Urroz. Esto hace que la inyección de intensidad de protección llegue mejor a los extremos. Otra consideración de importancia es que el punto de inyección se encontrará próximo ( 5 km ) del cruce con el FF.CC. Castejón – Alsasua, que es el punto potencialmente más agresivo para la integridad del gasoducto.

Se ha comprobado que las resistividades de los terrenos de ambas ubicaciones son adecuadas para la instalación de los lechos anódicos.

### 1.7.3. LECHOS DE ANODOS

El lecho de ánodos nº 1, asociado a la EPC1 se situará a 106 m de la tubería. Sus coordenadas UTM serán: X 636801 / Y 4720380. Esto queda indicado en el plano EM-01.

El lecho de ánodos nº 2, asociado a la EPC2 se situará a 110 m de la tubería en el Tramo Ezperun – Beriain y a 112 m en el Tramo Ezperun - Urroz. Sus coordenadas UTM serán: X 617489 / Y 4731050. Esto queda indicado en el plano EM-02.

### 1.7.4. TOMAS DE POTENCIAL

Se ubicarán en puntos de fácil acceso, junto a caminos y procurando que queden en los límites de fincas para no perjudicar en sus labores agrícolas a los propietarios.

La Norma UNE 12954 indica que para el caso de tuberías enterradas es suficiente instalar tomas de potencial a intervalos adecuados, preferiblemente a no más de 3 km, a lo largo del trazado de la tubería. Esto se ha tenido en cuenta en este Proyecto y la separación entre tomas de potencial no ha llegado en ningún caso a esa distancia.

En la Tabla que se muestra a continuación se indican las tomas de potencial tanto simples como especiales con su denominación, número de plano de ubicación, punto kilométrico del gasoducto en el que irán instaladas y coordenadas UTM para su rápida localización. Se incluye también el vértice de gasoducto más próximo a la toma de potencial.

#### Tramo Lumbier-Ezperun

Nº Plano	Vértice	TP / TPE	PK	Coordenadas X / Y
L-01	Inicio gasoducto	TPE-1	0,194	636630 / 4720068
L-02	V-LE-01	TP01	1,238	635788 / 4720514
L-03	V-LE-04	TP02	3,190	634620 / 4721768
L-04	V-LE-08	TP03	5,203	632757 / 4722133
L-05	V-LE-15	TP04	7,348	630555 / 4723121
L-05	V-LE-19	TP05	9,124	628918 / 4723562
L-07	V-LE-22	TP06	11,201	627594 / 4724816
L-07	V-LE-25	TP07	13,195	625939 / 4725979
L-07	V-LE-27	TP08	14,850	624489 / 4726796
L-09	V-LE-31	TP09	16,963	622837 / 4728013
L-09	V-LE-35	TP10	19,044	621295 / 4729300
L-11	V-LE-38	TPC1	20,885	619787 / 4730020
L-11	V-LE-39	TP11	21,430	619460 / 4730140
L-11	V-LE-42	TP12	23,081	617846 / 4730531
L-12	Posición Ezperun	TPE-2	23,656	617478 / 4730852

#### Tramo Ezperun - Beriain

Nº Plano	Vértice	TP / TPE	PK	Coordenadas X / Y
L-12	Inicio Tramo	TPE-3	0,078	617343 / 4730960
L-12	V-EB-03	TP13	2,050	615542 / 4731439
L-13	V-EB-04	TP14	4,171	613620 / 4730692
L-13	V-EB-06	TPE-4	5,039	612740 / 4730514
L-13	V-EB-07	TPE-5	5,159	612610 / 4730518
L-13	V-EB-09	TP15	6,398	611535 / 4731012
L-15	V-EB-11	TP16	7,932	610458 / 4732045
L-15	Posición Beriain	TPE-6	8,507	610373 / 4732676

#### Tramo Ezperun – Urroz

Nº Plano	Vértice	TP / TPE	PK	Coordenadas X / Y
L-12	Inicio Tramo	TPE-7	0,065	617483 / 4730946
L-16	V-EU-03	TP17	2,094	619053 / 4732148
L-16	V-EU-05	TP18	4,094	620974 / 4732465
L-17	V-EU-08	TP19	6,143	622473 / 4732730
L-18	V-EU-11	TP20	8,017	623077 / 4735131
L-19	V-EU-13	TP21	9,690	624818 / 4736125
L-20	Posición Urroz	TPE-8	11,346	624956 / 4737672

#### 1.7.5 CONJUNTOS ELECTRODO - PROBETA

Se instalarán conjuntos electrodo de referencia y probeta junto a las siguientes tomas de potencial:

Tramo Lumbier – Ezperun	TP04 / TP08 / TPE-2
Tramo Ezperun – Beriain	TPE-4 / TPE-6
Tramo Ezperun – Urroz	TP19 / TPE-8

## **ANEXO 1.8.1 PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DE TUBERÍAS DE ACERO ENTERRADAS**

## INDICE DEL ANEXO 1.8.1 PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DE TUBERÍAS DE ACERO ENTERRADAS

1.8.1.1. EL FENOMENO DE LA CORROSION .....	26
1.8.1.2. CORROSIÓN EN TUBERÍAS DE ACERO ENTERRADAS .....	29
1.8.1.3. AGRESIVIDAD DEL TERRENO .....	31
1.8.1.4. PROTECCION CATODICA .....	36
1.8.1.4.1. POR ÁNODOS REACTIVOS .....	40
1.8.1.4.2. POR CORRIENTE IMPUESTA .....	45
1.8.1.5. MEDIDAS DEL POTENCIAL DE LA ESTRUCTURA .....	51
1.8.1.6. DIBUJOS EXPLICATIVOS .....	58

### 1.8.1.1. EL FENOMENO DE LA CORROSION

Los metales tienden a volver a su estado natural de óxidos, hidróxidos y sales. Esto conlleva una degradación química o electroquímica del metal originada por el medio que le rodea, llamada oxidación del metal.

Estos fenómenos de corrosión se ven fomentados al entrar en contacto la humedad y el metal. Es el caso de la gran mayoría de los problemas de corrosión que se dan en la vida diaria.

Si tenemos un metal con sus iones y electrones en equilibrio y el electrolito que le rodea es tal que absorbe los electrones, se pierde el equilibrio y los iones metálicos pasan a la solución. Este proceso continuará mientras se siga absorbiendo electrones. El metal pasa a ser ión positivo, con tendencia a combinarse con los iones negativos de la solución.

Según la Ley de Faraday, en un proceso electroquímico, la cantidad de masa de metal depositada sobre un cátodo o consumida en un ánodo puede determinarse aplicando la fórmula

$$m = \frac{1}{96540} \cdot \frac{M}{n} \cdot I \cdot t$$

siendo

m = masa del metal perdida o depositada, en gramos

M = masa atómica

n = valencia

I = intensidad en amperios

t = tiempo en segundos

para el hierro, m=10 kg/A.año

Un amperio de salida constante de una estructura de acero consume 3 cm<sup>3</sup> de metal al día.

### EQUILIBRIO IÓNICO Y POTENCIAL DE ELECTRODO. POTENCIAL ELECTROQUIMICO

Un metal sumergido en un electrolito tiene tendencia a emitir iones positivos (cationes) que pasan a la disolución y el metal queda cargado negativamente. El proceso continúa hasta que se establece un equilibrio iónico, dado que al tener carga eléctrica de distinta polaridad, los electrones se oponen al alejamiento de los iones positivos. Este fenómeno produce la denominada doble capa electrones-iones en la superficie del metal.

Debido a la doble capa aparece entre el metal y el electrolito un “potencial de electrodo”, cuya magnitud viene dada para cada metal y electrolito. El valor de este potencial se obtiene mediante la fórmula de Nernst:

$$E = E_o + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \log C$$

siendo

$E$  = potencial de equilibrio en voltios

$E_o$  = potencial normal del metal sumergido en una solución normal de una de sus sales

$R$  = constante de los gases perfectos. 8,314 Julios / Kelvin

$T$  = temperatura absoluta en grados Kelvin

$n$  = valencia del ión

$F$  = 96.500 Culombios

$C$  = concentración de iones del metal en la solución.

Se denomina “potencial normal” al de equilibrio determinado para una concentración  $C=1$  ( $E = E_o$ )

A continuación se muestra una tabla con los potenciales normales de algunos metales con relación al electrodo de hidrógeno y a 25° C

METAL	POTENCIAL ( V )
ORO	1,42
PLATINO	1,20
PLATA	0,80
COBRE	0,34
HIDRÓGENO	0 por convenio
PLOMO	-0,13
NÍQUEL	-0,25
HIERRO	-0,44
ZINC	-0,76
ALUMINIO	-1,67
MAGNESIO	-2,34

Esta lista de valores de potencial determinados bajo condiciones estándar de temperatura, presión y concentración se conoce como Serie de Potenciales Estándar de Electrodo.

El valor del potencial de electrodo se establece midiendo la diferencia de potencial entre el metal y un electrodo de referencia estándar por medio de un voltímetro. Se ha tomado como referencia el electrodo de hidrógeno, al cual se le ha asignado el valor cero. La medida del voltímetro es la diferencia entre el potencial de electrodo y el electrodo de referencia empleado.

En el extremo superior de la tabla tenemos los denominados metales nobles, como el oro y la plata, que no son reactivos, no tienen tendencia a pasar al estado iónico y por lo tanto no se corroen, y si lo hacen vuelven fácilmente a la forma de átomo metálico en los procesos de electrodeposición, refinado y metalurgia extractiva.

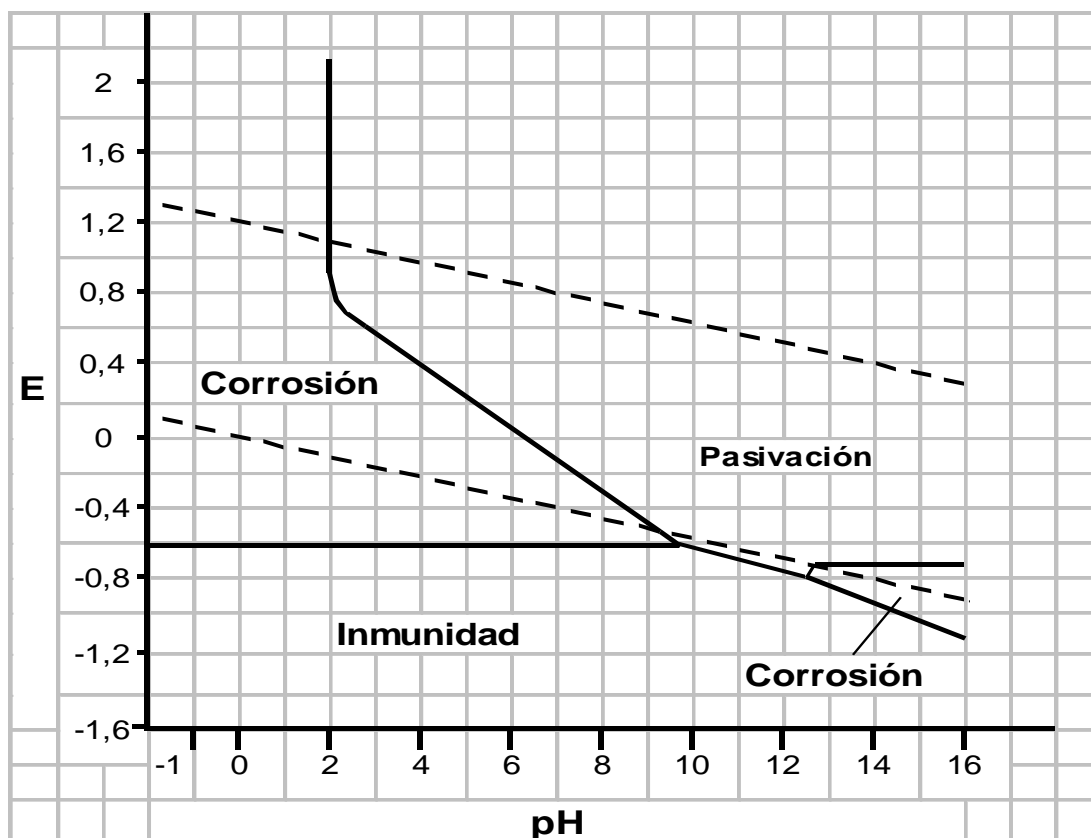
El extremo inferior es el activo, ya que en él se encuentran metales como el magnesio, con fuerte propensión a formar iones que no tienden a volver al estado metálico. Esto conlleva una gran facilidad para la corrosión.

## DIAGRAMAS DE CORROSIÓN

Anteriormente se ha dicho que el potencial de electrodo depende de la concentración de iones del metal en el electrolito. Asimismo, conociendo el potencial de electrodo de un metal para un determinado electrolito, se puede determinar la concentración de iones del metal en la disolución.

El profesor Pourbaix estableció un método de cálculo que permitió establecer el equilibrio entre el metal y la solución acuosa que plasmó en representaciones gráficas llamadas "diagramas de corrosión" de cada metal. En ordenadas se representan los potenciales de electrodo respecto del electrodo de referencia considerado. En abscisas figuran los valores del pH ( cologaritmo de la concentración de protones ) del electrolito. De esta forma obtuvo diagramas de corrosión para el hierro, cobre, aluminio, plomo, zinc, etc. Para la gran mayoría de las aplicaciones el de más interés es el diagrama del hierro.

A continuación se muestra el diagrama de Pourbaix para el hierro, en el que se muestran las zonas en las que el metal se encuentra en estado metálico ( inmune a la corrosión ), disuelto en forma de iones ( corrosión ), de precipitación de óxido o de hidróxido ( pasividad frente a la corrosión ).



Del análisis del diagrama se deducen varios métodos para evitar la corrosión del acero:

- Elevar el potencial para situarnos en la zona de pasividad. A este



procedimiento se le llama protección anódica. No se emplea en el caso del acero debido a que los óxidos protectores son inestables, todo lo contrario que en el caso del aluminio, para el que sí se emplea este método.

- Hacer que el medio sea alcalino y su pH sea mayor de 10
- Reducir el potencial para situarnos en zona de inmunidad. **Este es el fundamento de la Protección Catódica.**

Como ejemplo, a continuación se muestran los valores del potencial crítico en voltios de algunos metales con relación al electrodo de Cu/SO<sub>4</sub>Cu según el profesor Pourbaix:

	pH=0	pH=7	pH=14
Plata	+0,13	+0,13	0
Cobre	+0,17	+0,27	-0,69
Plomo	-0,62	-0,62	-1,25
Zinc	-1,26	-1,26	-1,69

#### 1.8.1.2. CORROSIÓN EN TUBERÍAS DE ACERO ENTERRADAS

En estructuras enterradas las principales causas de corrosión son las siguientes:

- Creación de pilas. Que pueden producirse por Pares galvánicos o por Aireación diferencial ( Efecto Evans )
- Corrosión bacteriana
- Corrientes vagabundas

En la creación de pilas tenemos dos electrodos metálicos sumergidos en un electrólito. En el caso de tuberías de acero enterradas el electrólito es el terreno que las rodea. Si los electrodos son de metales distintos, la diferencia de potencial entre ellos es la diferencia de los potenciales de electrodo entre los metales y el electrólito. Si se conectan dichos electrodos mediante un conductor externo, se produce una corriente eléctrica desde el electrodo más electropositivo al otro a través del conductor. El circuito eléctrico se cierra a través del electrólito, donde se establece un trasiego de iones desde el metal más electronegativo ( ánodo ) al más electropositivo ( cátodo ). La corrosión del metal que actúa de ánodo se produce debido a la pérdida de iones metálicos.

Aunque en principio puede pensarse que en el caso de que los dos electrodos sean del mismo material no se establece la corriente eléctrica, si el electrólito no es homogéneo los potenciales de electrodo son distintos, con lo que existe una diferencia de potencial de electrodo y consecuentemente puede establecerse una corriente eléctrica. Este fenómeno de pilas oreadas se da en la práctica en estructuras metálicas enterradas.

**PARES GALVÁNICOS.** Los pares galvánicos son pilas que se establecen debido a la diferencia de potencial entre materiales distintos. el metal menos noble se constituye en ánodo, lo que produce su corrosión.

Un ejemplo son los tubos en los que se unen un tramo de cobre y otro de hierro, o un tubo de cobre soportado directamente por piezas de hierro. El metal menos noble en

este caso es el hierro, que se corroe.

Los pares galvánicos también pueden aparecer en estructuras compuestas por un solo metal si este presenta heterogeneidades en su composición. Como ejemplo están las inclusiones de sulfuros en aceros dulces o la corrosión al unir tuberías de acero nuevas con otras viejas o de fundición.

**PILAS GEOLÓGICAS.** Fenómeno también llamado aireación diferencial. Las heterogeneidades en el electrolito también son causa de corrosión. Según el llamado efecto Evans, cuando el electrolito contiene concentraciones heterogéneas de oxígeno, esto provoca corrosión.

Si tenemos un metal que contiene una cavidad debida a la inclusión de una impureza, el oxígeno en este punto no puede penetrar, mientras en el resto de la superficie del metal se produce oxigenación. Se produce una pila en la que el ánodo será el metal que no se oxigena. La corrosión aparece en la inclusión de la impureza.

Una conducción metálica de gran longitud que se encuentre enterrada atraviesa terrenos ( electrolito ) de muy distinta composición, por lo que se establecerán pilas en las que las zonas anódicas del tubo tenderán a corroerse, frente a las zonas catódicas que quedarán protegidas. También se crean micropilas en la superficie del metal debido a rugosidades, relieves de soldaduras, roces producidos por herramientas,...

**CORROSIÓN BACTERIANA.** Existen determinadas bacterias, fundamentalmente las sulfatorreductoras, que aceleran o incluso provocan procesos de corrosión. Normalmente se trata de bacterias anaerobias. Utilizan el hidrógeno para reducir los sulfatos a sulfuros. Dado que estos últimos se separan del metal, se produce una despolarización que lleva a que la corrosión continúe mientras haya sulfatos.

Las conducciones metálicas pueden verse atacadas por este tipo de corrosión.

Este tipo de oxidación se ve favorecida por :

- Las imperfecciones en la superficie del material. Estas determinan que se inicie el proceso de corrosión y la posterior acción de los microorganismos.
- La influencia del medio. El que el medio que rodea al material metálico contenga compuestos orgánicos, nitratos, fosfatos, sulfatos,... facilita la proliferación de bacterias.

También ha de tenerse en cuenta la influencia de la temperatura. Aunque cada microorganismo se desarrolla mejor a una determinada temperatura, entre 25 y 30°C será generalmente su nivel óptimo.

En cuanto al pH, la acidez o alcalinidad del medio favorece o inhibe el desarrollo de las bacterias, según el germen de que se trate. Puede considerarse que el pH más conveniente es el neutro.

**CORRIENTES VAGABUNDAS.** Se llaman corrientes vagabundas o parásitas a las que llegan hasta las estructuras enterradas desde otras instalaciones próximas. Estas corrientes penetran en la tubería y al salir para cerrar el circuito provocan corrosión en el punto de salida de la corriente.

Dada la extensión de las consideraciones sobre este fenómeno, se tratará en el ANEXO 1.8.2.

## DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE CORROSION

Sabiendo qué factores propician la corrosión en el caso de tuberías enterradas, hay que tratar de determinar el riesgo con el que nos vamos a encontrar antes de instalar dicha conducción.

En la fase de proyecto se debe realizar un estudio del trazado para analizar la naturaleza de los terrenos que se van a atravesar, su agresividad frente al acero, si se trata de tierras muy heterogéneas, existencia de corrientes vagabundas, ... Para esto es necesario realizar mediciones de la resistividad eléctrica del suelo que nos indicarán la existencia de terrenos de composición muy diferente e indicarán el grado de agresividad del suelo, analizar la proximidad de sistemas de protección catódica, subestaciones eléctricas, vías férreas electrificadas, ... que pueden producir corrientes vagabundas.

### 1.8.1.3. AGRESIVIDAD DEL TERRENO.

Es importante evaluar la agresividad del suelo que va a estar en contacto con la tubería ya que es uno de los factores que más influyen en la posible corrosión del acero.

A continuación vamos a analizar brevemente algunos parámetros que hacen que el terreno sea agresivo.

#### Humedad.

Los suelos que almacenan agua son más corrosivos que aquellos que no la retienen y hay que considerar que es muy difícil que el suelo no tenga humedad, teniendo en cuenta la atmosférica, los gradientes de temperatura y la presencia de sales higroscópicas que van a hacer que siempre exista un cierto grado de humedad.

La humedad tiene gran influencia en la resistividad del terreno. Un terreno húmedo tiene una resistividad mucho más baja que cuando está seco. Esto hace que las variaciones climatológicas influyan notablemente sobre el valor de la resistividad. Los terrenos son más agresivos en época de lluvias.

#### Presencia de corrientes vagabundas

Las corrientes parásitas más peligrosas suelen ser las producidas por las vías férreas electrificadas. Para su detección y evaluación se realizan registros de potencial en los puntos de cruce o aproximación de la tubería a la vía. En estos registros se puede apreciar cual es el sentido de las corrientes y decidir la instalación de juntas aislantes en el tubo.

En el caso de que produzcan cruces con otros conductos protegidos catódicamente se han de instalar cajas de potencial en los puntos de cruce, a las que se ha de llevar un conductor desde cada tubería, de forma que se puedan controlar los potenciales en ambas y realizar un equilibrado si se estimase oportuno.

#### Porosidad.

Se define a la porosidad de determinado terreno como la relación entre el volumen de los huecos y el volumen aparente total de la masa de tierra estudiada. Girard y Poirier han encontrado una corrosión máxima cuando la relación entre humedad y porosidad es del orden de 0,5.

### Temperatura.

La influencia de la temperatura se debe al hecho de que la resistividad depende del contenido de agua del suelo y el agua tiene un elevado coeficiente de temperatura.

La resistividad aumenta si disminuye la temperatura. En el caso de que el agua llegue a helarse la resistividad aumentará de forma muy brusca.

### PH

En la gran mayoría de los terrenos el pH es de entre un 5 y un 8, por lo que no resulta un factor influyente en la corrosión. El problema se puede encontrar en suelos muy ácidos, con pH inferior a 4, que pueden provocar ataques corrosivos en muchos metales. Esto se puede producir en terrenos pantanosos o con gran cantidad de materia orgánica. En terrenos muy alcalinos con pH superior a 8,5 pueden dar problemas los metales anfóteros, como el Zn, Al o Pb.

A continuación se muestra una tabla que relaciona el pH de un terreno con su corrosividad:

pH	MEDIO	CORROSIVIDAD
< 4	Acido muy fuerte	Muy agresivo
4 ÷ 4,5	Muy ácido	
4,5 ÷ 5	Acido	
5 ÷ 6	Moderadamente ácido	
6 ÷ 6,5	Poco ácido	Agresivo
6,5 ÷ 7,5	Neutro	No agresivo
7,5 ÷ 8,5	Poco alcalino	
> 8,5	Alcalino	Agresivo para metales anfóteros

### Potencial de oxidación - reducción.

La magnitud de este potencial nos indica exclusivamente el riesgo de corrosión anaerobia de una estructura metálica enterrada.

Puede decirse que si un suelo contiene sulfatos y su potencial redox es inferior a 200 mV es posible que existan bacterias corrosivas.

La relación entre el potencial de oxidación-reducción y el riesgo de corrosión anaerobia es la siguiente:

Potencial Redox (mV)	Riesgo de corrosión anaerobia
< 100	Severo
100 ÷ 200	Moderado
200 ÷ 400	Ligero
> 400	Nulo

Contenido en sales.

A mayor cantidad de sales la resistividad de suelo disminuye, haciéndolo más conductor y potenciando las pilas de corrosión.

Los cloruros tienen la propiedad de anular la pasividad de los metales.

Los sulfatos favorecen la aparición de bacterias sulfatorreductoras productoras de corrosión bioquímica.

Se considera que concentraciones de aniones cloruro y sulfato de 100 ppm de  $\text{Cl}^-$  y 200 ppm de  $\text{SO}_4^{2-}$  son las más propiciadoras de la corrosión del hierro y del acero.

Lo expuesto anteriormente se puede resumir en los siguientes puntos, para más adelante analizar cómo combatir la corrosión:

- El metal se corroe en la zona de salida de la corriente eléctrica. Esta es la zona anódica.
- La zona de metal por la que penetra la corriente eléctrica ( zona catódica ) no se corroe, si su potencial llega a ser de protección.
- La corriente atraviesa el electrolito desde el ánodo hasta el cátodo
- la corriente atraviesa el cable de conexión desde el cátodo hasta el ánodo
- La corrosión es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo e inversamente proporcional a la resistencia eléctrica del circuito interpuesto y a la superficie de la zona de corrosión. Esto indica que un pequeño poro puede producir una corrosión muy rápida.

Así pues, se deduce que para evitar la corrosión hemos de procurar:

- Que no exista contacto entre la estructura metálica que pretendemos proteger y el electrolito ( terreno ). Para esto se emplean revestimientos, pinturas,...
- Cortar la continuidad eléctrica entre metales de distinta composición mediante juntas aislantes que impidan los pares galvánicos.
- Evitar que la tubería sea el cátodo.
- Dotar a la tubería de un potencial de inmunidad ante la corrosión.
- Evitar en lo posible la entrada de corrientes parásitas

Para conseguirlo se emplean los siguientes métodos:

- Pinturas y revestimientos aislantes. ( protección pasiva )
- Protección catódica ( protección activa )

#### 1.8.1.4. PROTECCIÓN PASIVA

La protección pasiva consiste en evitar el contacto entre el tubo y el terreno para impedir la circulación de corriente eléctrica entre ellos. Para conseguirlo se utilizan pinturas y revestimientos.

En el caso de tuberías de acero enterradas, se trata de recubrir la superficie del metal para crear una barrera que rompa la pila que se establece entre el metal y el electrólito. Se utilizan para revestir las soldaduras de tuberías y los desperfectos que puedan aparecer en los revestimientos de fábrica, que pueden producirse durante el transporte, por alguna piedra, golpes durante la obra, etc. Para su aplicación en obra o reparación es imprescindible que la superficie a revestir esté limpia de grasa o polvo.

El revestimiento ha de tener las siguientes características:

- Buena adherencia al metal, para evitar zonas con aire en las que se produce corrosión aun aportando protección catódica.
- Resistencia mecánica frente a golpes. Si es necesario, recubrir con otro material que absorba los impactos.
- Alto poder dieléctrico para evitar en lo posible la circulación de corriente entre el metal y el terreno. Se tiene en consideración un parámetro llamado resistencia de aislamiento referida a  $1\text{m}^2$  de canalización, que se define como el producto de la resistividad transversal por el espesor del revestimiento. Se consideran satisfactorios valores superiores a  $10^8 \Omega\text{m}^2$ . Un revestimiento plástico se considera aceptable cuando su rigidez dieléctrica es superior a 10 kV/mm.

Una vez revestida la tubería y justo antes de enterrarla se realiza un control de la rigidez dieléctrica del revestimiento aplicando un voltaje entre la masa del tubo y un muelle de espiral que se desliza sobre la superficie encintada. En el caso de que exista un poro o una imperfección en el revestimiento, salta un arco voltaico que nos indica el fallo y su ubicación.

Las características de un revestimiento de calidad son:

- Porosidad mínima
- Mínima capacidad de absorción de humedad
- Resistencia a los agentes químicos. Si a la tubería se le aplica protección catódica, su pH se eleva hasta valores de 9 a 13, con lo que las bandas aislantes deberán ser resistentes a los álcalis
- Resistencia a los agentes biológicos. Los hongos, bacterias y microorganismos pueden degradar los componentes de las cintas. Las cintas de polietileno expandido son las de mejor comportamiento frente a estos ataques.
- Elasticidad. No solo para hacer más fácil su aplicación, sino también para absorber las dilataciones y flexiones de la tubería.
- Amplio rango de temperaturas de utilización, para evitar reblandecimientos y pérdida de adherencia.
- Gran adaptación a las diferentes superficies, que en ocasiones ponen a prueba la adherencia del producto ( curvas, protuberancias en cordones de soldadura,...)
- Facilidad de aplicación y reparación.

Se debe tener en cuenta que un pequeño defecto local de revestimiento es más perjudicial que la falta de revestimiento de toda la estructura. Tomemos como ejemplo una tubería de acero con una salida de corriente de 10 A. Esto produce una pérdida de material de 10 gr en 1 hora . Si la zona anódica es de 10 cm<sup>2</sup> de superficie, se traduce en una pérdida de espesor de 1,3 mm, mientras que si la superficie anódica es de 1 cm<sup>2</sup> la reducción de espesor es de 1,3 cm.

Esto puede producirse por la presión sobre el revestimiento de una piedra, que acaba rompiendo el aislante y queda tocando al metal. Se trata del caso más desfavorable de corrosión electroquímica, en el que la corrosión puede provocar la perforación del tubo con gran rapidez, dado que al proceso electroquímico se le suma el de corrosión por aireación diferencial. La concentración de oxígeno en el punto de contacto de la piedra con el metal es menor que en el entorno, con lo que ese punto se configura como anódico.

### Revestimiento en frío

Se emplean bandas plásticas, adhesivas o no, de polietileno y cloruro polivinilo.

- Bandas plásticas adhesivas.- son las más empleadas debido a su facilidad de aplicación y garantía de eficacia. Se presentan en rollos de anchura comprendida entre 50 y 200 mm.

Su correcta aplicación exige una buena limpieza y secado de la tubería. Se va colocando la cinta de forma manual o con herramientas mecánicas, tensando constantemente y rodeando al tubo en espiral y solapando una vuelta con la siguiente poniendo atención en que no queden bolsas de aire. El solape ha de ser como mínimo de un 50%.

- Bandas plásticas no adhesivas.- se pegan a la tubería mediante una imprimación que contiene un inhibidor de corrosión. A esta imprimación se la denomina "Primer". Se suministran en rollos de medidas similares a las autoadhesivas. Para su aplicación, se realiza una correcta limpieza del tubo, se aplica el Primer y se deja que seque un poco. A continuación se coloca la banda plástica rodeando a la tubería en espiral y solapando una vuelta con la siguiente. Tiene un inconveniente frente a las bandas autoadhesivas, y es que la zona de solape carece de pegamento y por capilaridad puede penetrar el agua del terreno.

El PVC necesita el aporte de plastificantes para hacerlo flexible, y con el tiempo se degradan, dejando el recubrimiento rígido y quebradizo. El polietileno es un material flexible, por lo que no tiene ese problema. Por otra parte, el PVC posee menor resistencia eléctrica y aguanta menor rango de temperatura que el polietileno y es más sensible a los ataques de los microorganismos.

### Revestimiento en caliente

Se emplean productos termorretráctiles. Se fabrican a base de polietileno extruido con un aporte de masilla no endurecible. Al aplicar calor se adhieren al metal, evitando la entrada de humedad. Es importante aplicarlos con la temperatura adecuada, dado que si esta es baja se pierde adherencia y si es excesivamente alta se produce

coquización y disminuyen las propiedades mecánicas.

Se presentan en tres formatos:

- Manguitos cerrados
- Manguitos abiertos
- Bandas termorretráctiles

- Los manguitos cerrados tienen forma tubular y al carecer de juntas han de enfundarse en la tubería antes de realizar la soldadura de unión de tubos. Al estar dimensionados para el diámetro de tubería determinado se evitan errores en las medidas y al no tener junta se evita el parche de cierre. Por el contrario tienen el inconveniente de que al tener que estar presentado sobre la tubería a la espera de que se realice la soldadura puede quedar expuesto a la intemperie durante un largo periodo de tiempo, degradándose el material.

- Los manguitos abiertos consisten en una lámina que se coloca, solapada, sobre la superficie a revestir. Sobre la junta del solape se aplica un parche para evitar que se despegue el borde. Se recomiendan para tuberías de diámetro superior a 10”.

La ventaja de los manguitos abiertos frente a los cerrados es que se aplica de forma inmediata sin tener que presentarlo previamente, pero se requiere más habilidad en la colocación final.

- Las bandas termorretráctiles son similares a las de revestir en frío, pero al aplicarles calor quedan como los manguitos termorretráctiles. Se emplean para revestir las curvas y codos de la tubería.

Además del revestimiento, se ha de rodear dicha estructura de un medio de alta resistividad que dificulte al máximo la circulación de corriente entre el metal y el medio externo (electrólito), con lo que se dificulta la aparición de pilas de corrosión. Para conseguir esto último se suele emplear arena lavada de río.

#### 1.8.1.4. PROTECCION CATÓDICA

La protección pasiva no es suficiente para evitar la corrosión de conducciones enterradas, debido a la dificultad de mantener en perfectas condiciones el revestimiento y a que a menudo nos encontramos con suelos muy agresivos o corrientes vagabundas muy peligrosas para la conservación tanto del revestimiento como de la propia tubería.

La protección catódica es un método para evitar la corrosión de la estructura metálica que queremos proteger que consiste en dotar a esta de un potencial tal que la inmunice. Se hace circular por el terreno una corriente eléctrica continua desde los ánodos hacia la superficie metálica de la estructura a proteger. Se crea una pila de forma que la estructura a proteger es el cátodo o electrodo negativo; se instala otra estructura metálica que es el ánodo y por tanto se va a corroer, y el electrólito es el medio que se interpone entre ellas.

Ante la imposibilidad de medir el potencial metal-electrólito en el punto de contacto se realiza la medida respecto a un electrodo de referencia.



La velocidad de corrosión de un metal en el suelo es una función del potencial E de dicho material en el medio que le rodea y disminuye a medida que el potencial se va haciendo más negativo.

## CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA

El potencial del metal con respecto al electrolito para el cual la velocidad de corrosión es  $< 0,01$  mm por año se denomina potencial de protección  $E_p$ . Esta velocidad de corrosión es suficientemente baja como para que no ocurran daños por corrosión durante la vida de diseño. El criterio para la protección catódica es que se cumpla

$$E \leq E_p$$

Siendo E el potencial de la estructura a proteger. Este potencial depende del metal del que se trate.

La norma UNE-EN 12954 establece que los potenciales de protección para una tubería de acero enterrada son:

Medio		Potencial de protección $E_p$ ( V )
Agua y suelos en condiciones aerobias	Condición normal $T < 40^\circ\text{C}$	- 0,85
	$T < 60^\circ\text{C}$	- 0,95 *
	Suelo arenoso aireado $100 < \rho < 1000 \Omega\text{m}$	-0 75
	Suelo arenoso aireado $\rho > 1000 \Omega\text{m}$	-0,65
Agua y suelos en condiciones anaerobias		-0,95

\* Para temperaturas entre 40 y 60°C se puede interpolar el potencial de protección.

Según la Tabla anteriormente expuesta, para el acero al carbono enterrado el potencial de protección respecto al electrodo de Cu /  $\text{SO}_4\text{Cu}$  es de  $-850$  mV para suelos aerobios y cuando el terreno que forma el electrolito es anaerobio el potencial de protección baja hasta los  $-950$  mV.

Para gozar de un margen de seguridad se establece el criterio de dotar a la estructura a proteger de un potencial que no suba de los  $-1000$  mV pero que no sea demasiado bajo para no producir daños en otras estructuras o en el revestimiento de la tubería que se intenta proteger. Si no se detectan corrientes vagabundas a las que contrarrestar, el valor mínimo de potencial se fija en  $-3000$  mV

Existen unos parámetros básicos que se han de conocer para una correcta implantación y evaluación de la protección catódica de una estructura. Son los siguientes:

- Potencial mínimo negativo que debe tener la tubería respecto al suelo
- Resistividad del terreno
- Conductividad y estado del revestimiento
- Medición del potencial tubo-suelo a lo largo de la traza

### Densidad de corriente de Protección.

Sobre la densidad de corriente necesaria para proteger catódicamente una estructura influyen diversos factores, como la composición del terreno que la rodea, la calidad del revestimiento y de su colocación o el envejecimiento de la instalación.

La siguiente tabla muestra los valores estimados de densidad de corriente de protección que hay que aplicar al acero para que quede protegido frente a la corrosión, en función de la calidad del revestimiento y del medio agresivo en el que se encuentre:

Estado superficial	Medio agresivo	Densidad de Corriente (mA/m <sup>2</sup> )
Acero desnudo	Suelo neutro o estéril	5 ÷ 17
Acero desnudo	Suelo aireado y seco	5 ÷ 17
Acero desnudo	Suelo húmedo	28 ÷ 66
Acero desnudo	Suelos muy ácidos	36 ÷ 170
Acero desnudo	Suelos con bacterias	450
Acero bien revestido	Suelo normal	Revestimiento nuevo: 0,1 Revestimiento envejecido: 0,2
Acero muy bien revestido (polietileno extruido)	Cualquiera	Revestimiento nuevo: 0,01 Revestimiento envejecido: 0,1

La corriente de protección ha de ser tal que garantice que la estructura alcanza el potencial de inmunidad en todos sus puntos, pero sin llegar a un potencial excesivamente negativo que produzca hidrógeno y pueda provocar la separación del revestimiento de la tubería. Como punto de partida se suele estimar una densidad de corriente en función del revestimiento aislante y a partir de esto se calcula la intensidad necesaria.

Cuando se trata de diseñar el sistema para una estructura ya enterrada se puede realizar un test para determinar las necesidades de corriente eléctrica para su protección. Para ello se monta un circuito mediante el que vamos aplicando corriente a la estructura y comprobamos el potencial tubo-electrodo. De esta manera conocemos la cantidad real de intensidad que necesitamos para dotar a la estructura del potencial deseado.

Una vez que se tiene el dato de la densidad de corriente necesaria se calcula la superficie a proteger y obtenemos la intensidad necesaria haciendo

$$\text{Intensidad} = \frac{\text{Densidad de corriente}}{\text{Superficie}}$$

Esta es la corriente mínima necesaria para garantizar que toda la estructura de acero tendrá un potencial de –850 mV respecto al electrodo de Cu/SO<sub>4</sub>Cu.

## CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA

La Protección Catódica no se aplica exclusivamente como método para la protección de estructuras de acero, sino que se hace extensiva a aquellas instalaciones metálicas que están rodeadas de un medio que pueda actuar como electrólito. De hecho este sistema nació para combatir la corrosión de embarcaciones.

Entre las aplicaciones que la utilizan se pueden nombrar las siguientes:

- Protección externa de las conducciones metálicas enterradas o sumergidas ( acueductos, gasoductos, oleoductos,...)
- Protección interna de canalizaciones metálicas que transportan agua y en particular agua de mar
- Protección externa e interna de depósitos metálicos enterrados
- Protección de cascos de buques y de tanques de lastrado
- Protección de la envoltura metálica de los cables eléctricos o telefónicos
- Protección externa de los pozos de petróleo, gas o agua
- Protección de las armaduras metálicas para hormigón
- Protección de tuberías de hormigón armado
- Protección de diques flotantes
- Protección de refrigeradores e intercambiadores de temperatura
- Protección de las rejillas de centrales térmicas

## SISTEMAS QUE EMPLEAN EL PRINCIPIO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA

Existen tres sistemas que aplican el principio de la protección catódica para evitar la corrosión de estructuras enterradas:

- Por ánodos reactivos
- Por corriente impuesta
- Por drenaje de corriente

A continuación se analizan los métodos de ANODOS REACTIVOS y CORRIENTE IMPUESTA. Los DRENAJES DE CORRIENTE se verán en el ANEXO 1.8.2, dado que se trata de un método de protección catódica específico para combatir corrientes vagabundas.

#### 1.8.1.4.1. POR ANODOS REACTIVOS

Se trata de conectar mediante un conductor la estructura enterrada a proteger con uno o varios ánodos de un metal más electronegativo. Estos ánodos han de estar enterrados en el mismo medio que la estructura.

( Ver dibujo explicativo nº 2 del apartado 1.8.1.7 )

El electrodo anódico de sacrificio se corroe al salir de él la corriente que circula del metal más electropositivo al más electronegativo por el conductor y del más electronegativo ( ánodo ) al más electropositivo a través del electrólito.

Se diseña la instalación de forma que los ánodos de sacrificio duren un determinado número de años, dado que una vez que se consuman la tubería queda sin protección.

Este tipo de protección es muy adecuado como protección provisional mientras se instala otro sistema. Un ejemplo claro de esto último se da en gasoductos, oleoductos, y en general conducciones largas en construcción en las que puede haber tramos de tubería enterrada que pueden quedar protegidos provisionalmente mediante ánodos de sacrificio. Dado que se van uniendo tubos y por lo tanto aumentando la superficie, no se realiza un cálculo de los ánodos necesarios, sino que se instala un ánodo cada 200 m por ejemplo, dependiendo del diámetro de la tubería, y se controla el potencial en los extremos del tramo enterrado.

#### TIPOS DE ÁNODOS DE SACRIFICIO

Para proteger a una tubería de acero se emplean ánodos realizados con magnesio, zinc o aluminio y sus respectivas aleaciones, cuyo potencial de electrodo es sensiblemente inferior al de protección del hierro, es decir, los que se encuentren por debajo de él en la Serie Electroquímica.

Se les entierra contenidos en un saco de algodón y rodeados de una mezcla que asegura que el desgaste del ánodo sea regular. Una composición muy usada de dicha mezcla activadora es la siguiente:

Yeso hidratado:	70 - 75 %
Bentonita:	25 - 20 %
Sulfato de sodio:	5 %

#### Propiedades de los ánodos de sacrificio.-

- El potencial de disolución para proteger el acero ha de estar entre  $-950$  y  $-1700$  mV respecto al electrodo de  $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$ , suficiente para inmunizar el metal pero no excesivamente negativo por ser antieconómico y acortar la vida del ánodo.
- Debe tener poca tendencia a la polarización. No debe crear películas pasivantes
  - Debe tener un elevado rendimiento eléctrico en Ah / kg de metal
  - La corrosión del ánodo ha de ser uniforme
  - Deberá poder ser fundido en diferentes formas y tamaños
  - La relación coste/características electroquímicas ha de ser razonable.

Rendimiento de un ánodo de sacrificio es el consumo de material del ánodo empleado en la salida de corriente, en relación con el consumo de material total, incluyendo las pérdidas por autocorrosión. Los rendimientos suelen estar entre un 50 y un 90 %.

A continuación se comparan las características de los ánodos de sacrificio más empleados:

#### Anodos de aluminio.-

- Ventajas:
  - Consumo reducido
  - Potencial aceptable ( - 1,05 V )
  - Temperatura de utilización elevada ( hasta 100°C, pero con rendimiento del 25% )
- Inconvenientes:
  - Bajo rendimiento en medio ácido
  - Le afecta la salinidad marina
  - Posibilidad de pasivación en estructuras pintadas
- Aplicación:
  - Plataformas offshore
  - Conductos offshore cálidos
  - Interior de depósitos

#### Anodos de Zinc:

- Ventajas:
  - Potencial aceptable ( - 1,10 V )
  - Buen comportamiento en cualquier medio
  - Baja tendencia a la polarización
- Inconvenientes:
  - Temperatura máxima de utilización: 60°C
  - Peso específico elevado
  - Consumo elevado en agua de mar
- Aplicación:
  - Conductos de pequeña o mediana longitud
  - Estructuras sumergidas
  - Depósitos

#### Anodos de magnesio.-

- Ventajas:
  - Potencial alto
  - Polarización rápida
  - Bajo peso específico

- Inconvenientes:
  - Potencial a veces excesivo
  - Vida reducida
  - Bajo rendimiento en agua por autocorrosión
  - Consumo elevado
- Aplicación:
  - Conductos enterrados
  - Conductos offshore desde plataformas
  - Protección provisional de conductos enterrados

## DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO

Para implantar un sistema de protección catódica mediante ánodos de sacrificio es necesario conocer:

- Superficie metálica a proteger
- Características del revestimiento
- Resistividad del terreno donde van a instalarse los ánodos
- Características de los ánodos a emplear
- Intensidad necesaria
- Resistencia anódica
- Intensidad anódica
- Número de ánodos
- Vida de los ánodos

### Resistencia anódica

Para calcular la resistencia a tierra de un ánodo enterrado en vertical se utiliza la fórmula de H.B. Dwight, basada en las dimensiones del ánodo:

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{8L}{d} - 1 \right)$$

*[ Fórmula 2, empleada en el Documento 2, Cálculo del lecho anódico nº 2 ]*

donde  $R_v$  es la resistencia a tierra del ánodo, en  $\Omega$   
 $\rho$  es la resistividad del terreno en  $\Omega \text{ cm}$   
 $L$  es la longitud del ánodo en cm  
 $d$  es el diámetro del ánodo en cm

Para el cálculo de la resistencia de un ánodo enterrado en horizontal Uhlig indica que la fórmula a aplicar es la siguiente:

$$R_h = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \left[ \frac{4L^2 + 4L\sqrt{(2h)^2 + L^2}}{2dh} \right] + \frac{2h}{d} - \frac{\sqrt{(2h)^2 + L^2}}{L} - 1 \right)$$

donde  $R_h$  es la resistencia a tierra del ánodo, en  $\Omega$   
 $h$  es la profundidad al centro del ánodo, en cm

Para el cálculo de la resistencia a tierra de un grupo de ánodos verticales se aplica la fórmula de Sunde:

$$R_n = \frac{\rho}{2\pi NL} \left( \ln \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} \ln 0,656N \right)$$

*[ Fórmula 3 empleada en el Documento 2, Cálculo del lecho anódico nº 1 ]*

donde  $R_n$  es la resistencia a tierra del conjunto de ánodos, en  $\Omega$   
 $N$  es el número de ánodos  
 $S$  es la distancia entre ánodos, centro a centro.

## Intensidad de corriente anódica

Según la ley de Ohm esta intensidad será

$$I_a = \frac{V - E}{R + \Sigma R_i}$$

donde  $V$  = potencial de disolución del ánodo respecto al electrodo de referencia, en voltios.

$E$  = potencial de protección del metal. Para el acero, -0,85 V respecto al electrodo de Cu/SO<sub>4</sub>Cu.

$R$  = resistencia anódica en  $\Omega$ .

$\Sigma R_i$  = resto de resistencias del circuito ( resistencia de fuga, del terreno, de los conductores,... )

Dado que el parámetro  $\Sigma R_i$  es complicado de calcular y su influencia despreciable, se considera que podemos hallar la intensidad que puede aportar el ánodo haciendo:

$$I_a = \frac{V - E}{R}$$

Siendo  $V - E$  = diferencia de potencial entre el potencial de disolución del metal anódico en el medio agresivo y el potencial de protección.

$R$  = resistencia del ánodo

En definitiva, la intensidad anódica es función del potencial de disolución y de la resistencia anódica que resulta de las características geométricas de los ánodos, de la resistividad del terreno y de las resistencias adicionales de los cables y de la propia tubería.

Otro método para calcular la intensidad anódica es emplear la ley de Faraday, pero hay muchos factores que introducen errores:

- El rendimiento electroquímico no es del 100 %. Recién instalado el ánodo da la máxima cantidad de corriente y con el paso del tiempo se va polarizando y la intensidad suministrada decrece.

- La autocorrosión del metal anódico hace que el rendimiento sea inferior al 100 %.

- La ley de Faraday no tiene en cuenta la morfología del ánodo, la mayor o menor superficie de contacto con el terreno. Un ánodo con aristas suministra más corriente que otro cilíndrico.

### Número de ánodos

El número de ánodos a instalar depende de la resistividad del terreno, de la superficie de la estructura y del revestimiento aislante, de forma que la intensidad de corriente suministrada por los ánodos sea la suficiente para conseguir un potencial respecto al electrodo  $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$ , en el punto de la tubería más alejado del lugar de implantación de los ánodos, de -850 mV en el caso de una tubería de acero.

Sabiendo qué cantidad de corriente eléctrica necesitamos para proteger la estructura ( $I$ ) y cuánta intensidad puede aportar cada ánodo ( $I_a$ ), el número de ánodos necesarios para dar protección al metal será:

$$n^\circ \text{ ánodos} = \frac{I}{I_a}$$

### Vida de los ánodos

Para calcular la duración que se puede esperar conseguir de un ánodo se emplea la siguiente fórmula:

$$T = \frac{C \cdot P \cdot \eta \cdot 0,85}{I_a \cdot 8760}$$

siendo

$T$ : duración del ánodo en años

$C$ : capacidad de corriente del ánodo, en Ah/kg

$P$ : peso del ánodo, en kg

$\eta$  = Rendimiento del ánodo

$I_a$ : intensidad suministrada por el ánodo, en A

8760: nº de horas al año

0,85: se trata de un factor de utilización, ya que se considera que



cuando el ánodo tiene consumido el 85% de su masa su resistencia a tierra se incrementa hasta el punto de no entregar corriente de protección.

El rendimiento aproximado de los ánodos de zinc es del 80% y el de los de magnesio del 50%

Ventajas e inconvenientes de la protección mediante ánodos de sacrificio

Ventajas

- No necesita fuente de energía eléctrica.
- Larga duración si se dimensiona adecuadamente.
- Facilidad de instalación.

Inconvenientes

- Potencial de disolución fijo. No es posible adaptar el potencial a cada circunstancia.
- Solo es útil en terrenos de resistividad elevada ( $\rho > 150 \Omega m$ )
- Alcance muy limitado, siendo necesario instalar muchos ánodos en caso de tuberías largas.
- Riesgos de polarización y de reacciones químicas en terrenos de peculiares características ( margas muy secas, terrenos con componentes químicos, ...)

#### 1.8.1.4.2. POR CORRIENTE IMPUESTA

Se trata de conseguir el potencial de inmunidad del metal inyectándole una corriente continua . El polo negativo se conecta a la tubería a proteger, que actuará como cátodo. El polo positivo se conecta al ánodo de sacrificio, que se consumirá ( corroerá ) lentamente.

El circuito eléctrico que se forma es el siguiente: la corriente generada por una fuente de alimentación pasa al terreno a través del lecho dispersor, que estará formado generalmente por varios ánodos, atraviesa el suelo y entra a la tubería, por la cual cierra el circuito hasta la alimentación.

*( Ver dibujos 3, 4 y 5 al final del ANEXO )*

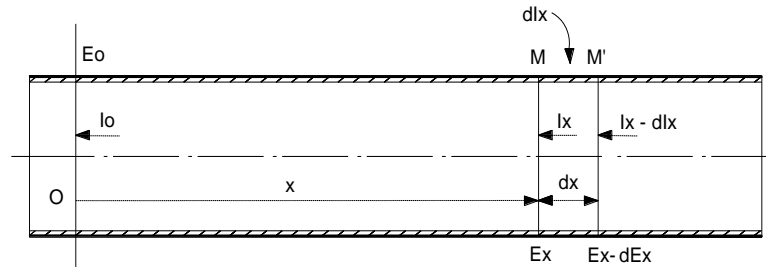
Es el método más empleado para la protección de tuberías de gran longitud.

#### ESTUDIO MATEMÁTICO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA EN TUBERIAS EMPLEANDO EL MÉTODO DE CORRIENTE IMPUESTA

Según se ha expuesto anteriormente, para dar protección catódica a una tubería metálica revestida de gran longitud instalamos una fuente de corriente continua con el polo negativo conectado al tubo y el positivo a un lecho dispersor anódico que se sitúa a cierta distancia de la tubería. Si el sistema está bien dimensionado el resultado será que el potencial de la superficie de la tubería respecto al terreno que la rodea disminuye hasta

alcanzar potenciales de protección. El potencial de la tubería va a sufrir un aumento a medida que nos alejamos del punto de inyección de la corriente. Este aumento es exponencial, tal como se va a demostrar:

En el siguiente dibujo vemos una porción de tubería a la que se protege catódicamente.



La nomenclatura para cada parámetro que interviene en el desarrollo matemático es la siguiente:

- O: punto de inyección de la corriente de protección
- x: distancia desde el origen de inyección de la corriente al punto M
- dx: porción de tubería situada a la distancia x del origen
- Eo: potencial en el punto origen
- Ex: potencial a la distancia x ( V )
- dEx: pérdida de potencial entre los puntos M y M' ( V )
- Io: corriente en el origen ( A )
- Ix: corriente que circula por la tubería en el punto x ( A )
- dlx: corriente que penetra en el tubería por la porción dx ( A )
- Rex: resistencia equivalente  $E_x / I_x$  de la tubería en el tramo x (  $\Omega$  )
- r: resistencia longitudinal de la tubería (  $\Omega / m$  ).
- R: resistencia transversal de la tubería con revestimiento aislante (  $\Omega m$  ).
- a: coeficiente de atenuación de la tubería ( 1 / m ).

$$a = \sqrt{\frac{r}{R}}$$

Rc: resistencia característica de la tubería (  $\Omega$  )       $Rc = \sqrt{r \cdot R}$

La entrada de corriente dlx en el tramo dx es

$$dI_x = \frac{E_x}{R} dx$$

La caída de tensión en el tramo dx recorrido por la corriente  $I_x$  es

$$dEx = r \cdot dx \cdot I_x$$

Derivando ambas ecuaciones respecto a x se obtiene

$$\frac{d^2 I_x}{dx^2} = \frac{r}{R} I_x \quad \text{y} \quad \frac{d^2 Ex}{dx^2} = \frac{r}{R} Ex$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones diferenciales tenemos:

$$Ex = E_0 \text{Ch} x - R_c I_0 \text{Sh} x$$

$$I_x = I_0 \text{Ch} x - \frac{E_0}{R_c} \text{Sh} x$$

Si consideramos una tubería de longitud L (m), el Potencial y la intensidad a la distancia x sabiendo el potencial  $E_0$  son:

$$Ex = E_0 \frac{\text{Ch}(l-x)}{\text{Ch} l}$$

$$I_x = \frac{E_0}{R_c} \frac{\text{Sh}(l-x)}{\text{Ch} l}$$

Potencial e intensidad a la distancia x sabiendo la intensidad  $I_0$ :

$$Ex = I_0 R_c \frac{\text{Ch}(l-x)}{\text{Sh} l}$$

$$I_x = I_0 \frac{\text{Sh}(l-x)}{\text{Sh} l}$$

Conociendo el potencial  $E_l$  en el extremo final, los valores en el punto de inyección son:

$$E_0 = E_l \text{Ch} l$$

[ Fórmula 1 empleado en el Documento 2, Cálculo de la atenuación del potencial ]

$$I_0 = \frac{E_l}{R_c} \text{Sh} l$$

Conociendo el potencial y la intensidad al final de la tubería, los valores en un punto intermedio x son:

$$E_x = E_l \cdot \frac{L-x}{L}$$

$$I_x = \frac{E_l}{R_c} \cdot \frac{L-x}{L}$$

En el *dibujo 6 del Apartado 1.8.1.7* puede observarse la distribución de la corriente de protección, que parte del lecho anódico. A medida que nos alejamos del punto de inyección de corriente se produce una atenuación del potencial de protección ( $E_0$ : potencial en el punto de inyección,  $E_l$ : potencial a la distancia L del punto de inyección). Se trata de evitar que el potencial en el extremo del gasoducto sea superior a  $-0,85$  V, dado que nos encontraríamos fuera del margen de potenciales de protección catódica para el acero.

Cuanto mayor es la resistencia específica del revestimiento menor es la atenuación del potencial.

## LECHO DE ANODOS

Es el conjunto de ánodos desde los cuales se inyecta la corriente de protección al terreno. También se le denomina lecho dispersor. Los ánodos se unen entre sí mediante un conductor que a su vez se conecta al polo positivo del rectificador.

Estos ánodos se van a sacrificar para proteger a la estructura metálica. A medida que sale de ellos la corriente de protección, se consumen, con una rapidez que es función del tipo de material del que están compuestos.

Su vida es mucho mayor que la de los ánodos de sacrificio sin inyección de corriente, dado que son conductores de dicha intensidad, no productores de la misma. Se suelen calcular para una duración de veinte años. Para dimensionar el lecho anódico se ha de tener en cuenta la resistividad del terreno en el que van a ir alojados los ánodos y que la resistencia a tierra de estos sea lo más baja posible.

Su instalación se realiza enterrándolos en posición vertical u horizontal según las características del terreno en el que se van a alojar ( resistividad, composición,...) con el fin de dispersar mejor la corriente.

( Ver dibujo 7 al final del ANEXO )

La separación entre ánodos es de unos 5 m para evitar interacciones y el conjunto del lecho dispersor ha de estar a una distancia de al menos 50 m a la tubería a proteger y con los ánodos formando una línea perpendicular a dicha tubería.

En el caso de que el terreno tenga más humedad ( y por tanto menos resistividad ) en zonas profundas que en la superficie se recomienda instalar ánodos enterrados en posición vertical. Para ello se realizan taladros en el fondo de la zanja por la que luego discurre el cable anódico, y de una profundidad de entre uno y dos metros. Centrados en los orificios se colocan los ánodos y se vierte el relleno por tongadas para permitir apisonarlo adecuadamente, de forma que quede perfectamente compactado y conseguir

un buen contacto entre el terreno y la tubería.

Para la realización del lecho dispersor pueden emplearse diferentes materiales en función de los siguientes factores:

- El terreno
- Intensidad que les va a atravesar
- Vida de los ánodos
- Economía

Los materiales más utilizados son:

- Chatarra de hierro.

Su ventaja es la economía, dado que el material es barato, pero actualmente se utilizan poco debido a que su ejecución requiere muchas soldaduras. Se emplea en terrenos de resistividad muy alta, aportándoles una mezcla a base de carbón de coque.

Su vida es corta. Se suelen consumir a razón de 9 Kg / A y año

- Ferrosilicio.

Se emplea en terrenos de resistividad media o baja rodeándolo de carbón de coque.

La intensidad máxima de salida es de unos 15 A por ánodo.

Para corrientes eléctricas bajas su vida es casi ilimitada, mientras que para intensidades altas se consume a razón de 0,5 a 0,9 Kg / A año

Como desventaja puede citarse su gran fragilidad, por lo que el diámetro ha de ser tal que le otorgue resistencia mecánica, con lo que su manejo es más incómodo.

- Grafito

Apto para terrenos de resistividad media. Está compuesto por grafito de alta pureza impregnado con ceras y resinas inertes.

Intensidad máxima de salida: 4 A por ánodo

Consumo: de 0,5 a 1 Kg / A año.

Muy empleado debido a que es económico.

Es frágil. Cada ánodo se entierra rodeado de 100 Kg de grafito o carbón de coque

Se suministra cada ánodo con el conductor, de forma que la conexión se realiza en fábrica, aislada con resina epoxi y manguito termorretráctil. Dicho conductor tiene una sección mínima de 10 mm<sup>2</sup> y una longitud de 3 m.

- MMO ( ánodo Mixto de Óxido Metálico )

Es la última generación de ánodos para lechos. Su empleo se está generalizando debido a sus buenas características, como son su uniforme y baja tasa de consumo ( de 1 a 6 mg por amperio y año ), su tamaño y peso muy reducidos y alta estabilidad química.

Están fabricados con un alma de titanio revestida de óxidos metálicos conductores de la corriente eléctrica que activan al titanio. Esta capa de activación puede estar formada por varios óxidos de metales tales como rutenio, iridio, platino, titanio y tántalo. Se fabrican en varias formas: hilo, pletina, barras y tubos de diferentes tamaños.

## LECHOS ANÓDICOS PROFUNDOS

Se emplean cuando la intensidad de protección no llega adecuadamente a la estructura, bien por que existan muchas conducciones ajenas enterradas que intercepten la corriente eléctrica y actúen como dispersores o induzcan interferencias, o porque la resistividad del terreno en las capas superficiales tenga valores demasiado elevados.

Para su realización se siguen los siguientes pasos:

Se excavan pozos, cuya profundidad depende de la composición del terreno, el nivel freático,... en ocasiones se llega a profundizar hasta 60 m. El diámetro del agujero es de 20 a 30 cm.

Se introducen en los pozos tubos de acero por los que luego se introducirán los ánodos. Estos se unen de forma provisional a un tubo de venteo de acero de unos 2,5 cm de diámetro interior y taladrado en las zonas en las que vayan alojados los ánodos. Dichos ánodos han de distribuirse manteniendo distancias iguales entre ellos. Se emplean centradores para ubicar correctamente el conjunto en todo el recorrido. A continuación se rellena el tubo exterior con carbón de coque. Es muy importante asegurarse de que el coque llega a penetrar a todos los puntos, que no queda ninguna zona en hueco. Se dejan pasar unas 24 horas para comprobar que no cabe más carbón. En la superficie se instala una arqueta en la que se coloca una pletina para sujetar el tubo de venteo.

Los cables de los ánodos se llevan a un cuadro de equilibrado en el que mediante el empleo de resistencias variables se ajusta la corriente de inyección de cada ánodo. Desde este cuadro se lleva el cable de inyección a la Estación de Protección Catódica.

( Ver dibujos 8 y 9 al final del ANEXO )

Efecto terminal.- se denomina de esta manera al fenómeno por el cual cuando a un ánodo se le solicita más corriente de salida de la nominal sufre un desgaste desigual, más acentuado en la zona de la conexión del conductor anódico. Hay fabricantes que tratan de limitar el efecto haciendo esta zona más gruesa que el resto, dotándola de protección aislante o realizando más de una conexión.

## MATERIAL DE RELLENO (BACKFILL)

El material de relleno, también denominado mezcla activadora, forma parte del ánodo y su misión es mejorar el contacto con el terreno, disminuyendo la resistencia, mantener cierto grado de humedad y hacer que el desgaste sea uniforme.

Con el nombre de backfill existen en el mercado distintos tipos de relleno. Se diferencian en su composición química. Los productos generalmente empleados son:

- Menudo de grafito natural. Se compone de carbono al 99% y una mezcla de sulfuros y cenizas.

Es muy empleado debido a sus buenas características eléctricas. La resistividad es menor cuanto mejor compactado esté el grafito, y se pueden conseguir valores de entre  $1 \times 10^{-3}$  y  $1 \times 10^{-5} \Omega m$ . El grafito se consume a razón de 1 kg/por A x año

- Menudo de coque de hulla. Contiene solo un 85 % de carbono. El resto son impurezas ( 10% cenizas y 5% sulfuros ). Es el de peor calidad.

- Menudo de coque de petróleo calcinado. De composición muy parecida al grafito

aunque con menos carbono. Es muy empleado.

El menudo ha de tener una granulometría de 3 mm como máximo y no exceder de un 10 % de polvo. Para cada ánodo se emplean unos 100 kg de relleno. Se pueden suministrar el ánodo y el relleno juntos en un saco textil.

En lo referente a las características eléctricas, la resistividad del backfill seco no ha de superar los 50  $\Omega\text{cm}$  y su desgaste nunca ha de ser mayor de 1 kg / Amp x año

Es muy importante que el backfill sea de buena calidad y que la cantidad e instalación sean correctas, ya que de ello depende el rendimiento del sistema de protección catódica.

Para que la distribución de la corriente de protección sea la adecuada el lecho dispersor ha de colocarse a una distancia mínima de 60 m de la estructura a proteger, dependiendo de la resistividad del terreno.

### RESISTENCIA DEL LECHO DISPERSOR

Para el cálculo de la resistencia a tierra Uhlig aplica las mismas fórmulas que para el caso de empleo de ánodos reactivos.

Para un grupo de ánodos en posición vertical se emplea la fórmula de Sunde

$$R_n = \frac{\rho}{2\pi NL} \left( \ln \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} \ln 0,656N \right)$$

[ Fórmula 2 empleada en el Documento 2, Cálculo del lecho anódico nº1 ]

donde  $R_n$  es la resistencia a tierra del conjunto de ánodos, en  $\Omega$

$N$  es el número de ánodos

$S$  es la distancia entre ánodos, centro a centro.

$\rho$  es la resistividad del terreno en  $\Omega\text{ cm}$

$L$  es la longitud de cada ánodo en cm

$d$  es el diámetro del ánodo en cm

Para un grupo de ánodos en posición horizontal se emplea la fórmula de Dwight modificada para compensar las interacciones entre ánodos

$$R_n = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$$

Siendo

$$r = \sqrt{\frac{\text{sección del ánodo en cm}^2}{\pi}} 0,5$$

### 1.8.1.5. MEDIDAS DEL POTENCIAL DE LA ESTRUCTURA.

Para poder realizar la medición del potencial en una estructura enterrada se instalan en la superficie cajas, llamadas tomas de potencial, a las que se llevan conductores que tienen el otro extremo soldado a la tubería.

Como se ha dicho anteriormente, el conjunto formado por la tubería enterrada, los ánodos de sacrificio y el terreno que les separa constituye una pila, y para medir el potencial de un electrodo necesariamente hemos de hacerlo respecto del otro electrodo.

El potencial de la tubería se mide respecto de un electrodo de referencia que debe poseer un potencial lo más estable posible, de forma que las variaciones de temperatura lo alteren lo menos posible y que no se polarice al ser atravesado por las corrientes ( anódicas o catódicas ).

El valor del potencial de protección establecido en  $-850$  mV es el de potencial real, o libre de caída óhmica  $IR$ , con respecto a un electrodo de referencia de  $Cu/SO_4Cu$  saturado. Ante las dificultades para medir este potencial real en las tuberías enterradas, en las que la resistividad de los terrenos en los que está instalada son muy diferentes, el criterio de protección es que el acero ha de estar a un potencial ON igual o inferior a  $-850$  mV respecto al electrodo de  $Cu/SO_4Cu$ .

La técnica de medida de los potenciales en sistemas dotados de protección catódica viene dada en la Norma UNE-EN 13509 “ Técnicas de medida en protección catódica”. En esta Norma se indica que se puede realizar la medición del potencial incluyendo la caída de tensión  $IR$  ( medición del potencial de conexión, **potencial ON** ) o sin la caída de potencial  $IR$  ( **potencial  $E_{IR\ free}$**  ).

### Medición del potencial ON

La medición del potencial ON se realiza sin desconectar la corriente de protección. La medida se realiza conectando a un voltímetro el conductor que viene de la tubería y el electrodo de referencia, depositado sobre el terreno.

Dado que la lectura que obtenemos con el voltímetro es la diferencia de potencial entre sus bornas, la corriente que circula a través del instrumento produce una caída de potencial en el circuito total que no queda reflejada en la lectura. Es por esto que cuanto mayor sea la resistencia interna del voltímetro y menor la del circuito a medir, formado por la estructura metálica, los conductores de conexión, el electrodo de referencia y el electrolito, los errores de medida serán menores.

También es importante tener en cuenta la ubicación del electrodo de referencia a la hora de realizar la medida. Existe un campo de corriente y de potencial rodeando a la tubería enterrada protegida católicamente, por lo que el suelo no es una superficie equipotencial. A medida que nos alejamos de la tubería el potencial del suelo será más positivo. Por esto se ha de tener en cuenta situar el electrodo de referencia en la superficie en la vertical del tubo, para hacer lo más pequeña posible esta otra caída de potencial  $IR$  que introduce error en la medida del potencial de protección.

La medición del potencial ON se realiza sin desconectar la corriente de protección. Los valores de potenciales  $E_{ON}$  contienen varias caídas de tensión  $IR$  desconocidas, que pueden variar con el tiempo y la ubicación del electrodo de referencia empleado. Las lecturas no muestran el potencial en la interfase entre el metal de la tubería y el electrolito.

Este tipo de medición se realiza para la supervisión del sistema de Protección Catódica, que nos da una idea de si la estructura está protegida, pero en caso de detectar influencias o zonas fuera del potencial de protección se han de emplear métodos de medida del potencial  $E_{IR\ free}$ .

( Ver dibujo 10 al final del ANEXO )



## Medición del potencial $E_{IR \text{ free}}$

Consiste en eliminar la caída de tensión IR haciendo 0 la corriente de protección.

Existen varias técnicas, que se diferencian en el tipo de corriente que causa la caída de potencial IR:

- Mediciones del potencial de desconexión
- Medidas intensivas
- Medición mediante probetas

Mediciones del potencial de desconexión.- se emplean cuando la corriente causante de la caída IR es la corriente de protección y no existen corrientes de compensación, pilas de corrosión debidas a ánodos o cátodos ajenos ni corrientes vagabundas. Los valores obtenidos se llaman potenciales de desconexión,  $E_{OFF}$ .

Se desconecta la EPC y se toma la medida del potencial de la estructura protegida. Si el electrodo está bien ubicado respecto a la tubería la medición durante el primer segundo después de la desconexión de la corriente de protección suele ser suficientemente precisa.

La proporción entre los periodos de conexión y desconexión debe ser tal que no produzca una despolarización significativa de la tubería. Cuanto mayor sea el período de medición mayor debe ser la proporción entre el período de conexión y el de desconexión.

Esta técnica también puede usarse en zonas afectadas por corrientes vagabundas provenientes del sistemas de tracción de corriente continua durante los intervalos en los que el sistema de tracción no está en funcionamiento.

Mediciones intensivas,- esta técnica está indicada cuando las corrientes que provocan la caída IR son corrientes de compensación, pilas de corrosión y corrientes vagabundas ajenas, fluctuantes o no.

Se miden simultáneamente los potenciales entre la tubería y el suelo y los gradientes de potencial horizontalmente opuestos asociados. Identifica defectos en el revestimiento y permite calcular los potenciales sin IR en los defectos. Se puede aplicar solamente cuando los gradientes de potencial son constantes con la distancia.

Las medidas intensivas se utilizan para determinar el potencial  $E_{IR \text{ free}}$  en los fallos de revestimiento que se hayan detectado.

Medición mediante probetas.- para comprobar el potencial de polarización de la tubería se emplea el método de electrodo probeta, con el que se elimina el factor IR anulando la intensidad de protección por interrupción de la inyección de corriente de la Estación de Protección Catódica y comprobando el efecto en una probeta.

Esta técnica puede emplearse para la medición del potencial sin IR sea cual sea la fuente de corriente. Mediante las probetas puede obtenerse información del potencial sin IR incluso en los casos en los que por las condiciones locales u operativas no puedan aplicarse las técnicas de desconexión o medidas intensivas.

Se instala una probeta de acero desnudo de características similares a las de la tubería que se quiere controlar y de una superficie conocida, que se conecta a la tubería

y por tanto queda protegida contra la corrosión con la corriente de protección catódica. En estas condiciones la probeta se comporta como un fallo de revestimiento. Cuando en un tramo de tubería existen varios defectos de revestimiento el potencial con menor protección se encontrará en el defecto que tenga más superficie. Sabiendo que en el revestimiento de polietileno extruido la media de los defectos tiene entre 1 y 2 cm<sup>2</sup> podemos considerar que una probeta que tenga 10 cm<sup>2</sup> de superficie de acero al desnudo será mayor que cualquier defecto que exista en la tubería. Medir el potencial en esta probeta es lo mismo que hacerlo justo en el defecto de mayor superficie. Si el potencial real medido en la probeta está dentro de los límites de protección podemos pensar que la tubería está correctamente protegida en el tramo donde está ubicada la probeta.

La probeta, normalmente de 10 cm<sup>2</sup> de superficie, se entierra lo más cerca posible a la tubería. La distancia entre el electrodo de referencia y la probeta debe ser la menor posible para que la medida esté menos influida por las corrientes vagabundas, que provocan caídas de tensión IR. Para evitar errores en la medición no debería haber intercambio de corriente entre la probeta y algún defecto del revestimiento de la tubería, cuando la probeta esté desconectada de la tubería.

Antes de realizar cualquier medición la probeta deberá estar polarizada, para lo que es necesario que haya estado en protección al menos uno o dos días.

Para medir el potencial real  $E_{IR \text{ free}}$  se procede de la siguiente manera: se mide el potencial probeta-electrodo y se desconecta la probeta accionando un pulsador, con lo que medimos el potencial  $E_{OFF}$  de despolarización de la probeta. Si se mide lo suficientemente rápido se obtiene la llamada curva de despolarización. En esta curva, el punto que nos proporciona la medida del potencial OFF, de referencia para saber si la tubería está protegida, se encuentra situado en el codo de la curva ( cambio de pendiente ) en el que la caída de potencial se suaviza después de un descenso brusco. Midiendo el potencial se restablece la inyección de corriente ( potencial ON ) podemos conocer la magnitud del factor IR. El tiempo necesario para obtener una medida correcta de este potencial OFF va desde algunas centésimas de segundo hasta décimas de segundo. Otro método es el de eliminar la inyección de corriente desde la EPC realizando cortes programados, pero tiene el inconveniente de que no se elimina totalmente el factor IR debido a las corrientes de compensación y a las corrientes vagabundas cuando existen.

En la realización de registros continuos los cortes de corriente para la medida de los potenciales  $E_{OFF}$  no deben ser prolongados para evitar que la excesiva despolarización de la probeta no permita una polarización suficiente en el tiempo y consecuentemente las medidas de los potenciales  $E_{OFF}$  posteriores no sean correctas.

Cuanto más tiempo se requiera para la despolarización, mayor es la protección que tiene la estructura enterrada. La curva de despolarización en un defecto de revestimiento depende de factores como son el tipo de suelo, tipo de revestimiento y su estado, densidad de la corriente de protección y existencia de influencias externas.

*( Ver dibujos 11, 12 y 13 al final del ANEXO )*

## ELECTRODOS DE REFERENCIA.

Una característica importante de los electrodos de referencia es que han de ser impolarizables, su fuerza electromotriz ha de ser estable.

Para el empleo en las instalaciones se tienen dos tipos de electrodos: portátiles, para realizar mediciones en las tomas de potencial llevándolos de una a otra, o permanentes, que se entierran junto a la tubería, bien para medir el potencial y llevar la señal a la Estación de Protección Catódica o para su empleo en juntas aislantes a las que se les quiere realizar un seguimiento especial.

En cuanto al material con el que están hechos, para estructuras enterradas se utiliza el de Cu / CuSO<sub>4</sub>, compuesto por una barra de cobre sumergida en una disolución saturada de sulfato de cobre. Para este tipo de estructuras también puede emplearse el electrodo de plata-cloruro de plata, pero su utilización más frecuente es en estructuras submarinas. La diferencia entre estos dos electrodos está en el potencial que se obtiene con cada uno de ellos. El criterio internacional para saber si una estructura de acero está protegida catódicamente es que el valor de su potencial de polarización sea más negativo de -850 mV con referencia al electrodo de Cu / CuSO<sub>4</sub> o de -800 mV con referencia al de Ag / ClAg.

Un electrodo de referencia está formado por un metal inmerso en una solución salina del mismo. Para minimizar los errores de medida, los electrodos portátiles se ubican apoyados en el terreno húmedo y sobre la vertical de la tubería y los electrodos de referencia permanentes se instalan lo más próximos posible a la estructura metálica a proteger y rodeados de un backfill de bentonita.

Al poner a un metal en contacto con el electrolito se producen dos fenómenos: la tendencia del metal a disolverse y quedar cargado negativamente, y el depósito de iones del electrolito sobre el metal, con lo que se llega a un equilibrio entre las cargas eléctricas que produce una diferencia de potencial. Para tener una referencia respecto a la que medir esa diferencial de potencial entre el metal y el electrolito se tomó por convención como electrodo patrón el normal de hidrógeno, al cual se le otorgó el valor cero a cualquier temperatura.

El electrodo de hidrógeno se emplea como patrón ( con él se obtiene la serie electroquímica de potenciales de los metales ) pero no es práctico para su empleo en campo, que exige robustez y manejabilidad.

Para tuberías de acero enterradas se emplea el electrodo de Cobre / Sulfato de Cobre ( Cu / CuSO<sub>4</sub> ), que tiene las siguientes características:

#### Electrodo de referencia de Cu / CuSO<sub>4</sub> portátil

Está formado por una barra de cobre sumergida en una solución saturada de sulfato de cobre, contenidos en un tubo de cobre o de plástico cerrado en un extremo por un tapón de material poroso que actúa de puente salino.

La reacción es la siguiente  $\text{Cu} + \text{SO}_4^{2-} \leftrightarrow \text{CuSO}_4 + 2\text{e}^-$

Su potencial respecto al electrodo normal de hidrógeno se ha establecido en 316 mV a 25°C.

Para evitar que el tapón poroso se seque en los periodos en los que no se utilice se cubre con una funda de goma.

#### Electrodo de referencia de Cu / CuSO<sub>4</sub> permanente

Se trata de un electrodo de referencia de Cu/Cu/SO<sub>4</sub> con una solución saturada de CuSO<sub>4</sub> químicamente pura para ser instalado de forma permanente en una toma de potencial donde se quiera que el electrodo está muy próximo a la tubería o estructura cuyo potencial se quiere medir o bien para llevar la señal de potencial a la Estación de Protección Catódica.

Está compuesto por un contenedor cerámico permeable relleno de una solución sulfato de cobre que se mantiene higroscópica al ir mezclada con un gel neutro e higroscópico. En el interior contiene una bobina o una barra de cobre puro. Se entierra rodeado de un backfill a base de bentonita sódica.

Tienen una gran superficie de contacto con el suelo ( $480 \text{ cm}^2$ ), por lo que su resistencia es baja. la cerámica tiene una porosidad adecuada para permitir un buen contacto y a su vez no permitir el escape de la solución interna.

#### Electrodo de referencia de Cu / $\text{CuSO}_4$ permanente con probeta incorporada

Se trata de un electrodo de referencia para instalación fija que lleva incorporada una probeta de acero para la medición del potencial de la estructura eliminando la caída de potencial IR.

( Ver dibujo 14 al final del ANEXO )

#### ELECTRODOS PARA CASOS ESPECIALES. INSTALACIONES PERMANENTES.

##### Electrodos de zinc

El Zinc es empleado como electrodo fijo debido a que aporta ventajas tales como que no requiere de preparación ni tiene que rehacerse, por lo que puede instalarse en un lugar desatendido

Suele emplearse simplemente en forma de barra de zinc de alta pureza. Una vez que se ha adaptado al medio en el que se instala aporta un potencial constante de unos  $-1100 \text{ mV}$  respecto al electrodo de Cu /  $\text{SO}_4\text{Cu}$  ( potencial de corrosión libre del zinc ). Es importante que el electrodo tenga bastante superficie para evitar problemas de polarización en el momento de la toma de lecturas.

Se recomienda su empleo en terrenos muy húmedos o cuando el electrolito es agua, ya que así se asegura un buen contacto entre electrodo y electrolito.

##### Electrodos para el hormigón armado

Para conocer la situación electroquímica del acero de estructuras de hormigón armado se utilizan electrodos que se dejan instalados dentro del hormigón. Hay que tener en cuenta que han de poseer como propiedad añadida el poder soportar las fuerzas de compresión producidas durante el fraguado del hormigón.

El más empleado es el de Cu /  $\text{SO}_4\text{Cu}$ , aunque también los hay de Mo /  $\text{MoO}_3$  y Hg /  $\text{HgO}$ .

#### MODO DE EMPLEO DE ELECTRODOS DE REFERENCIA

Si el electrodo de referencia es de Cu /  $\text{SO}_4$  el terminal positivo del voltímetro se conecta al electrodo y el negativo a la estructura. En el caso de que el electrodo sea de Zinc se debe invertir la polaridad de los terminales, ya que el zinc es más electronegativo que el acero.

Podemos establecer las ecuaciones eléctricas del circuito:

Si  $E$ = Potencial del electrodo de referencia

$P$ = Potencial de la tubería

$V$ = Lectura del voltímetro

$R_1$ = Resistencia del electrodo de referencia, fundamentalmente debida al puente salino.

$R_2$ = Resistencia del terreno

$R_3$  = Resistencia del voltímetro

$I$  = Corriente eléctrica a través de la pila formada por el electrodo de referencia y la tubería.

$$E - P = I (R_1 + R_2 + R_3)$$

$$V = I R_3$$

Luego 
$$V = (E - P) \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Esta expresión nos indica que para que el voltímetro nos dé una lectura exacta se ha de cumplir que

$$\frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 1$$

Es decir,  $R_3$  ha de ser mucho mayor que  $R_1 + R_2$ , con lo que la resistencia interna del voltímetro debe ser mucho mayor que la de la semipila y el electrolito.

Podemos encontrar electrolitos (terrenos) muy distintos, y por tanto resistencias muy diferentes. Los suelos secos son especialmente resistivos. Los electrodos dan diferencial de potencial de aproximadamente 1000 mV respecto al acero con protección catódica. Según esto, para que la precisión de la medida (sin tener en cuenta el propio error del aparato de medida) sea del 1% (10 mV) la resistencia del voltímetro  $R_3$  ha de ser 100 veces la de la suma del circuito de la pila  $R_1 + R_2$ , es decir, para un terreno seco la resistencia interna del aparato de medida ha de ser de varios MΩ.

#### PUENTE SALINO

Se debe procurar que el electrodo de referencia no contamine al electrolito y que no introduzca una resistencia eléctrica elevada en el circuito.

Con el paso del tiempo, el electrodo de Cu /  $\text{SO}_4\text{Cu}$  pierde tolerancia al paso de corrientes eléctricas relativamente altas debido a que se forman cristales de  $\text{SO}_4\text{Cu}$  y de óxido de Cu que se fijan sobre el metal. Por esto es necesario mantener limpio el electrodo para evitar un aumento de la resistencia eléctrica.

Otro factor que hace que la resistencia eléctrica del electrodo se eleve es el tamaño de los cristales de  $\text{CuSO}_4$ . Si dichos cristales son demasiado pequeños, se apelmazan y forman una capa con resistencia alta.

Es importante asegurar un buen contacto entre el electrodo de referencia y el terreno para minimizar la resistencia eléctrica. Resulta práctico realizar en el suelo un agujero en el que depositar el electrodo de referencia cuando vaya a tomarse medida del potencial. Para mejorar el contacto se puede mojar el fondo del agujero e incluso aportar sal.

#### DIMENSIONADO DE LA ESTACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Calcular la corriente de protección que ha de inyectar la Estación de Protección Catódica es muy complejo al tratarse de un circuito resistivo en el que intervienen elementos como el propio rectificador, los conductores que lo unen con la tubería y con el lecho anódico, el lecho y el terreno, con los cambios que se producen tanto por la climatología como por la afección de instalaciones ajenas.

Para el dimensionado de los parámetros eléctricos de la EPC se tienen varias opciones. La primera es aplicar el criterio de densidad de corriente de protección en función de la calidad del revestimiento y la agresividad de los terrenos. La segunda es realizar un cálculo riguroso que ha de tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Resistencia interna de la EPC,  $r$ .
- Resistencia del lecho dispersor,  $R$
- Resistencia de los cables anódico y catódico,  $r_a$  y  $r_c$ .
- Resistencia longitudinal de la tubería,  $r$ .
- Resistencia de fuga del revestimiento aislante,  $R$
- Resistencia del terreno,  $r_s$
- Potencial de contacto dispersor-suelo,  $E_s$
- Potencial de contacto tubería-suelo
- La fuerza electromotriz de la EPC

y aplicando la ley de Ohm a ese circuito cerrado, la corriente suministrada por el rectificador es

$$I = \frac{\sum E_j}{\sum R_j}$$

y una tercera opción: dadas las dificultades para conocer todos los factores y teniendo en cuenta que prácticamente toda la resistencia corresponde al lecho de ánodos y que los potenciales de contacto son despreciables respecto a la magnitud de la fuerza electromotriz suministrada por el rectificador, en la práctica se puede decidir calcular la intensidad aplicando la fórmula

$$I = \frac{V}{Ra}$$

y dar un margen amplio al voltaje de la EPC dado que luego va a poder ser ajustado mediante el regulador de tensión. Siempre se ha de tener en cuenta no rebasar el voltaje de seguridad de 50 V establecido por el Reglamento Electrotécnico como seguridad para las personas.

#### 1.8.1.6. DIBUJOS EXPLICATIVOS

1. Nº medidas resistividad en afección por Línea Eléctrica de Alta Tensión
2. Protección catódica mediante ánodos reactivos
3. Protección catódica mediante corriente impresa
4. Conjunto que forma un sistema de protección catódica
5. Esquema eléctrico de Estación de Protección Catódica
6. Atenuación del potencial en un sistema por corriente impresa
7. Tipos de lechos anódicos
8. Lecho anódico profundo
9. Cuadro de equilibrio de corrientes en lecho profundo
10. Medida del potencial ON
11. TP, electrodo de referencia y probeta para medida del potencial ON-OFF
12. Montaje para medida del potencial ON-OFF
13. Sección de Probeta
14. Tipos de electrodo de referencia de  $\text{Cu} / \text{CuSO}_4$

## **ANEXO 1.8.2. CORRIENTES VAGABUNDAS**

## INDICE ANEXO 1.8.2. CORRIENTES VAGABUNDAS

1.8.2.1 CONCEPTO DE CORRIENTE VAGABUNDA .....	61
1.8.2.2 CORRIENTES VAGABUNDAS PROVENIENTES DE SISTEMAS DE CORRIENTE CONTINUA .....	61
1.8.2.2.1. Detección y medición de las corrientes vagabundas de c.c. ....	62
1.8.2.2.2. Criterios de valoración .....	63
1.8.2.2.3. Afecciones más frecuentes .....	64
1.8.2.2.4. Prevención y actuación .....	66
1.8.2.3. CORRIENTES VAGABUNDAS PROVENIENTES DE SISTEMAS DE CORRIENTE ALTERNA .....	69
1.8.2.3.1. Diferencia de potencial máximo admisible por el revestimiento de la tubería .....	70
1.8.2.3.2. Influencias producidas por Líneas Eléctricas de Alta Tensión .....	71
1.8.2.3.3. Soluciones para mitigar la influencia de las Líneas Eléctricas de Alta Tensión .....	79
1.8.2.4. DIBUJOS EXPLICATIVOS .....	80.



### 1.8.2.1. CONCEPTO DE CORRIENTE VAGABUNDA

Corriente vagabunda o parásita es aquella que abandona el camino eléctrico por el que se preveía que fluyera y retorna a la fuente de alimentación por otro circuito que le opone menos resistencia de paso.

La corriente eléctrica vagabunda entra a la tubería enterrada afectada, que hace de ánodo, sale al terreno que es el electrólito y vuelve a la fuente que la ha generado, que es el cátodo. La corrosión se produce en la tubería enterrada al salir la intensidad al electrólito. La estructura que hace de cátodo queda protegida en detrimento de la que ejerce de ánodo.

La magnitud de la corriente eléctrica vagabunda que suele afectar a una estructura metálica no sería significativa si se repartiera por toda la superficie de dicha estructura, pero estas corrientes abandonan la conducción metálica para pasar al terreno en zonas de poca superficie que presentan discontinuidades, por ejemplo poros del revestimiento aislante, lo que hace que la densidad de corriente no sea despreciable, produciendo problemas de corrosión graves y en poco tiempo.

Se puede calcular el material perdido por corrosión debido a las corrientes vagabundas de c.c. aplicando la ley de Faraday. La cantidad de metal perdido en las zonas de salida de intensidad debido a las corrientes vagabundas cuando circula 1 Ah es de:

- Hierro: 1 gramo
- Plomo: 3,9 gramo
- Cobre :1,2 gramos

### 1.8.2.2. CORRIENTES VAGABUNDAS PROVENIENTES DE SISTEMAS DE CORRIENTE CONTINUA

Las corrientes vagabundas que provienen de sistemas de corriente continua pueden causar graves daños por corrosión en estructuras metálicas enterradas o sumergidas. De forma particular, las estructuras horizontales enterradas de gran longitud, por ejemplo, tuberías y cables con cubiertas metálicas, pueden ser puestas en peligro a causa de este tipo de corrosión. Dado que los daños producidos por la corrosión pueden aparecer después de una breve exposición a las corrientes vagabundas es importante tomar cuanto antes disposiciones sobre las medidas de protección, además de comprobar los efectos de estas medidas de forma regular.

Los sistemas de corriente continua que más frecuentemente provocan la circulación de corrientes por el terreno son:

- Sistemas de tracción eléctrica
- Sistemas de protección catódica

Durante la fase de diseño de las estructuras metálicas enterradas o sumergidas se debe tener en cuenta tanto la posibilidad de causar como la de sufrir interferencias derivadas de corrientes vagabundas.

Los problemas de interferencia eléctrica en estructuras enterradas o sumergidas se deben tener en cuenta teniendo además en consideración los siguientes puntos:

- Las corrientes vagabundas, especialmente las que provienen de sistemas de

tracción en corriente continua tienen relación directa con el diseño de los circuitos de retorno. Esto significa que es posible limitar la corriente vagabunda pero no hacerla desaparecer por completo.

- Cuando estén presentes otras estructuras que se puedan ver afectadas, el requisito de mantener las interferencias dentro de los límites definidos se aplica a todas las estructuras afectadas.

#### 1.8.2.2.1. DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE LAS CORRIENTES VAGABUNDAS.

Para identificar la existencia de interferencias causadas por corrientes parásitas se analizan los siguientes parámetros:

- Fluctuaciones de los potenciales entre la estructura y el electrolito
- Desviaciones de los potenciales normales entre la estructura y el electrolito
- Gradientes de tensión en el electrolito
- Corrientes en tuberías, probetas o cubiertas metálicas de cables

Dado que los potenciales generados por las corrientes vagabundas son de bajísima magnitud, para su detección se deben emplear los medios adecuados:

- Milivoltímetros de alta resistencia interna ( $20.000\ \Omega$ )
- Electrodo de referencia impolarizables: Cu/CuSO<sub>4</sub> para medidas en suelos
- El “cero” de diferencia de potencial entre los electrodos de medida no ha de superar los 2 mV.
- Emplear registradores de potencial de al menos 24 horas.
- Cuando la medición se vaya a efectuar en terrenos secos, humedecer la zona de contacto del electrodo de referencia para minimizar la caída de tensión entre el terreno y el electrodo.

Existen métodos de medida para la detección de corrientes vagabundas, como son la medición de campos eléctricos y la medición del potencial estructura metálica-electrodo. A continuación se describen estos métodos de medida:

Medidas de Campos Eléctricos.- se trata de medir gradientes de potencial en los terrenos en los que se sospecha la existencia de corrientes vagabundas. Se puede realizar utilizando dos electrodos (midiendo el potencial entre ellos). Mientras uno de ellos se mantiene fijo y situado sobre la traza de la tubería, el otro se va apoyando en el suelo describiendo una circunferencia alrededor del primero. La separación entre los dos electrodos no ha de ser inferior a 10 metros. Interpretando adecuadamente las mediciones se determina la dirección de las corrientes vagabundas que se van encontrando. En el caso de que en algún punto de medida no exista diferencia de potencial nos indica que los electrodos se encuentran sobre la misma superficie equipotencial. Si se produce un cambio en la diferencia de potencial con la dirección es indicio de existencia de corrientes vagabundas.

Tomando como base estas medidas Nekoksa clasifica las corrientes vagabundas de la siguiente manera:

Intensidad corrientes vagabundas	Gradiente de potencial medido
Débiles	< 0,5 mV / m
Moderadas	0,5 ... 5 mV / m
Fuertes	> 5 mV / m

Medidas de potencial de la estructura.- para la comprobación de si una estructura metálica enterrada está siendo afectada por corrientes parásitas lo más sencillo es la conexión-desconexión de la fuente de corriente continua que se sospecha que es la afectante. Se considera que si se detectan variaciones del potencial superiores a 20 mV se debe pensar en la existencia de corrientes vagabundas.

Si la estructura no dispone de protección catódica los potenciales naturales ( sin interferencias por corrientes vagabundas ) respecto al electrodo de Cu / Cu SO<sub>4</sub> son de entre 0,5 y 0,6 V. Cuando se miden potenciales más negativos es indicativo de que se trata de una posible zona de entrada de corrientes parásitas, mientras que potenciales más positivos indican que la zona posiblemente sufre salida de corrientes.

La medición de la amplitud y dirección del flujo de corriente y/o la variación de potencial en probetas o sondas de ensayo facilitará evaluar un posible riesgo de corrosión.

Interferencias no fluctuantes. En el caso de que se produzcan interferencias no fluctuantes deben medirse los potenciales de la estructura con relación al electrolito o los gradientes de tensión en el electrolito cuando la fuente de corriente vagabunda esté tanto en funcionamiento como sin funcionar. Se deben comparar los valores medidos en estas dos condiciones. Si la fuente de corriente vagabunda no se pudiera desconectar de forma temporal, se debería extrapolar la interferencia a partir de los ensayos realizados con diferentes condiciones de funcionamiento de la fuente de corrientes vagabundas.

Interferencias fluctuantes. Cuando los potenciales o las caídas de tensión medidas fluctúan, por ejemplo como resultado de una interferencia proveniente de un sistema de tracción en corriente continua, las mediciones han de realizarse con un aparato registrador gráfico continuo o con un registrador de datos. El registro de datos debe incluir el momento en el que se prevea que pueda suceder la máxima interferencia así como el momento sin interferencia, si es posible. Muchas fuentes de interferencia muestran sus niveles máximos y mínimos de interferencia durante un periodo de 24 horas.

#### 1.8.2.2.2. CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LAS CORRIENTES VAGABUNDAS

La interferencia anódica ( variación positiva del potencial en la estructura ) en estructuras sin protección catódica se considera aceptable si la variación del potencial  $\Delta U$  es menor que los criterios que se ofrecen en la siguiente tabla:

Metal de la estructura	Resistividad del electrolito $\rho$ ( $\Omega \text{ m}$ )	Variaciones máximas del potencial positivo $\Delta U$ (mV), incluyendo IR	Variaciones máximas del potencial positivo $\Delta U$ (mV), libre de IR
Acero, fundición	$\geq 200$	300	20
	De 15 a 200	$1,5 \cdot \rho$ ( $\Omega \text{ m}$ )	20
	$< 15$	20	20
Acero en hormigón armado enterrado		200	

La variación aceptable del potencial positivo  $\Delta U$  ( IR incluido ) tiene relación con la resistividad del electrolito, ya que la parte de la caída IR aumenta cuando la resistividad aumenta.

Se debe tener en cuenta que las estructuras protegidas contra la corrosión mediante protección catódica pueden estar expuestas a interferencias inaceptables derivadas de corrientes vagabundas si el potencial libre de IR está fuera del margen del potencial de protección

Para evaluar la aceptación de las interferencias derivadas de corrientes vagabundas se instalan electrodos probeta y probetas.

Interferencia catódica.- La interferencia catódica provocada por corrientes vagabundas debe considerarse inaceptable si hace que el potencial libre IR sea más negativo que el potencial limite libre de IR.

Las variaciones del potencial negativo provocadas por interferencias catódicas en ciertas partes de una estructura normalmente implican que existen otras partes que están sujetas a interferencias anódicas. Si las variaciones del potencial son muy negativas ( por ejemplo  $\Delta U > 500$  mV incluyendo la caída de IR ) se recomienda identificar zonas con variaciones de potencial anódico.

#### 1.8.2.2.3. AFECCIONES MAS FRECUENTES

##### TRANSPORTE ELECTRIFICADO.

Es una de las causas más frecuentes y peligrosas de generación de corrientes parásitas. En este apartado entran los ferrocarriles, tanto accionados con corriente continua como alterna, los empleados en minas, transporte urbano subterráneo, etc.

En este tipo de afección lo que se observa es que el potencial de la tubería enterrada cerca del ferrocarril varia siguiendo el movimiento de la locomotora. Esto se produce porque en el entorno de la vía férrea se crea un campo de potencial cuya influencia abarca centenares de metros. Las intensidades que alimentan al ferrocarril se generan en las subestaciones, y si son de corriente continua, normalmente está conectado el polo positivo al cable de catenaria y el negativo a la vía.

Cuando circula un tren, la corriente parte del positivo del generador, circula por la catenaria, el trole y el motor de la locomotora y pasa a los carriles, por los que retorna a

la subestación. A menudo sucede que los raíles no están aislados del suelo y esto facilita el paso de la corriente al terreno, con lo que se generan corrientes vagabundas. En estas condiciones, si en las proximidades de la vía férrea hay instalada una tubería metálica, esas corrientes parásitas la recorren para retornar por ella al punto más cercano a la subestación, dado que es el camino que les opone menor resistencia eléctrica. Esto hace que en la zona de salida de electrones de la tubería a la subestación se convierta en zona anódica, es decir, de corrosión.

*( Ver dibujo explicativo nº 1 en el apartado 1.8.2.4. )*

Estas corrientes parásitas producen continuas y bruscas variaciones del potencial, cuya magnitud depende de diversos factores como son la calidad del aislamiento eléctrico entre los raíles y el terreno, la resistividad del suelo que rodea a la conducción metálica afectada, la distancia entre el punto de afección y la subestación eléctrica que alimenta al ferrocarril.

Para poder analizar estas corrientes se instalan registradores de potencial en los que se registran las variaciones del potencial tubería-suelo y vía-suelo cada vez que pasa el tren. Se ha de registrar ese potencial durante al menos 24 horas. Posteriormente se analizan los registros para determinar si aparecen perturbaciones provocadas por el ferrocarril y decidir la medida correctora adecuada.

## ESTRUCTURAS CON PROTECCIÓN CATÓDICA

El sistema de protección catódica de una estructura puede provocar problemas por corrientes parásitas en otras estructuras vecinas.

Las probabilidades de afección no son las mismas si el sistema de protección catódica es por ánodos de sacrificio o por corriente impresa. En el primer caso tanto el voltaje como la intensidad utilizados son de poca magnitud y los ánodos se ubican próximos a la estructura que protegen, mientras que si el sistema es por corriente impresa los lechos anódicos se sitúan alejados de la tubería o estructura y tanto el voltaje como la corriente de protección son más elevados.

Cuando una tubería metálica enterrada se encuentra próxima a otra dotada con un sistema de protección catódica el campo eléctrico creado por el lecho anódico llega hasta la estructura afectada, en la que penetra una corriente eléctrica vagabunda ( convirtiendo a esa zona en catódica ) que posteriormente abandona la estructura afectada para retornar al rectificador, generando corrosión. Pueden darse las siguientes situaciones:

- Paralelismo o aproximación de las tuberías.
- Cruce de las tuberías. En este caso la corriente captada por la tubería afectada sale de esta en el punto de cruce de las tuberías para retornar al rectificador. Los puntos de cruce de tuberías son las zonas con más riesgo de sufrir rápidas corrosiones, dado que la tubería afectada ha podido recibir corriente parásita en una zona amplia de su superficie ( gran área catódica ) mientras que la corriente abandona la tubería por una superficie mucho más reducida y por tanto con gran densidad de corriente.
- Interferencia inducida. Se produce una interferencia anódica por la que parte de

la corriente emitida por el lecho de ánodos de protección de una tubería llega hasta una segunda conducción, de esta pasa a una tercera y retorna hacia el rectificador pasando a la primera tubería. La segunda conducción experimentará corrosión en el punto de cruce con la tercera conducción y esta se corroerá en el punto de cruce con la primera conducción .

#### 1.8.2.2.4. PREVENCIÓN Y ACTUACIÓN CONTRA LAS CORRIENTES VAGABUNDAS.

Para evitar la generación de corrientes vagabundas se deben seguir las siguientes recomendaciones:

- No utilizar la tierra como conductor de corriente.
- Dotar de un buen aislamiento eléctrico a los conductores de corriente
- Aislar las partes de la instalación susceptibles de captar corrientes vagabundas.
- Evitar diferentes tomas de tierra en un generador de intensidad.
- Las tomas de tierra han de ser las diseñadas para tal efecto, no estructuras enterradas existentes previamente.
- Inspección y correcto mantenimiento de las instalaciones para detectar fugas de corriente a tierra.
- Es preferible utilizar varios generadores pequeños distribuidos antes que el empleo de grandes rectificadores de corriente.

Dado que se trata de corrientes eléctricas podemos expresarlas según la ley de Ohm

$$I = \frac{V}{R}$$

siendo            V: diferencia de potencial entre los extremos del circuito  
                      R: resistencia total del circuito

y se deducen los siguientes métodos para reducir los efectos de la corrosión por corrientes vagabundas en estructuras metálicas enterradas:

Aumentando la resistencia R del circuito.- la resistencia total es la suma de las resistencias del electrolito, ánodo, cátodo y la de la propia estructura.

- Resistencia del electrolito.- se puede aumentar rodeando la estructura con un medio de gran resistividad (arena limpia y seca).
- Resistencias anódica y catódica.- recubrir estas zonas con un revestimiento que tenga un gran aislamiento eléctrico. Como ejemplo de esto podemos considerar una afección por protección catódica, que puede reducirse considerablemente revistiendo la zona de canalización próxima al lecho de ánodos afectante.
- Resistencia de la estructura.- si se trata de una conducción metálica, intercalar juntas aislantes y puentes resistivos.

Disminuyendo el potencial.- para ello aportamos una fuerza contraelectromotriz en la zona de salida de corriente. Si la intensidad de la corriente parásita no es muy grande se puede emplear una Estación de Protección Catódica, pero en otro caso no es un buen método debido a que se necesita inyectar una gran cantidad de corriente, lo cual es caro y provoca unos potenciales negativos demasiado elevados que pueden dañar los revestimientos.

Otros métodos de lucha contra las corrientes vagabundas son los apantallamientos metálicos y los drenajes

Utilizando apantallamientos metálicos.- se instalan placas metálicas cerca de la zona de salida de corriente del generador y se conectan al polo negativo de dicha fuente de corriente continua. Estas placas captan las corrientes vagabundas, evitando así que pasen a la estructura a proteger.

Mediante drenajes.- se trata de evitar la salida de intensidad de la estructura a través del electrólito, drenándola a través de un conductor y derivándola a la vía del ferrocarril ( polo negativo del generador de intensidad )

Si la corriente vagabunda que nos afecta se genera en una fuente de alimentación próxima y su potencial es siempre negativo respecto a nuestra estructura, lo más sencillo para evitar la corrosión debida a esa corriente es conectar un cable desde la tubería al polo negativo de la fuente generadora de la intensidad vagabunda. Con esto logramos que esa intensidad perjudicial retorne a su fuente por el cable de unión en lugar de hacerlo por el terreno.

En el caso frecuente de que la corriente vagabunda proceda de una línea de ferrocarril electrificado la solución se complica, debido a que los potenciales son muy variables tanto en polaridad como en magnitud, dado que dependen de la ubicación de la máquina motriz en cada momento. Es decir, en determinados momentos la corriente vagabunda puede circular en el sentido raíl-tubería y provocar en puntos de la estructura salida de corriente al suelo, con el consiguiente riesgo de corrosión. Para solucionar este problema se instala un drenaje de corriente, que permite el paso de la intensidad desde la tubería al raíl pero impide su circulación en el otro sentido.

Existen varios tipos de drenaje de corriente:

- Drenaje directo o franco
- Drenaje indirecto o dirigido
- Drenaje forzado

#### Drenajes directos

- Simples: unión directa de la tubería con la vía mediante un conductor.
- Resistivos: se controla la magnitud de la corriente que circula entre el tubo y la vía intercalando una resistencia variable.
- Unidireccionales. En ocasiones la vía es positiva respecto a la tubería. Para evitar esto se intercala un diodo que solo permita el paso de intensidad desde la tubería a la vía, y no en el sentido contrario.

#### Drenajes indirectos

Este método solo puede aplicarse si la vía es receptiva de corriente desde la



tubería, o sea, que su potencial es negativo respecto al del tubo.

A menudo la compañía de ferrocarriles no autoriza la instalación de drenajes. En estos casos se conecta a la tubería mediante un conductor un dispersor auxiliar de baja resistencia que se entierra en dirección a la fuente de corriente continua que provoca las corrientes vagabundas. Con esto se consigue dispersar las corrientes de retorno hacia la vía férrea a través del conductor, no desde la superficie del tubo.

También se utilizan en casos en los que la fuente de energía está muy lejos del tubo, con lo que no es efectivo el empleo de drenajes directos.

### Drenajes forzados

Se instala una fuente de corriente continua que fuerza la circulación de la corriente eléctrica por el conductor para evitar el retorno de la intensidad por el terreno. Se utilizan cuando la fuente de energía se encuentra lejos y la caída de tensión es elevada.

### Elementos constituyentes de un drenaje

La conexión a la vía ha de realizarse en coordinación con la compañía propietaria de esta última. Se conecta en una junta inductiva para evitar interferir en los circuitos de señalización del tráfico ferroviario.

Se instala un electrodo de referencia junto a la tubería para poder medir el potencial del tubo en el punto de drenaje.

El shunt se emplea para poder registrar simultáneamente la corriente drenada y el potencial de la tubería respecto al electrodo y comprobar mediante registros de 24 horas si realmente el tubo está protegido.

El fusible es del tipo extrarrápido para protección de los distintos elementos.

La protección contra sobretensiones se realiza mediante los descargadores a base de varistores, de forma que al sobrepasar el valor nominal ( 230 V ) se cortocircuitan y descargan la corriente a tierra.

Para el control del voltaje y la corriente del drenaje se instalan el voltímetro y el amperímetro. Tenemos lectura en el amperímetro cuando drena el aparato, o sea, cuando la vía es más electronegativa que el tubo. El voltímetro indica la diferencia de potencial entre la tubería y el rail cuando este es positivo respecto al tubo, dado que no hay circulación de corriente; en caso contrario indica 0, ya que está drenando corriente, o bien indica la pequeña caída de tensión provocada por la resistencia interna de los componentes del propio aparato.

Los diodos son de silicio y sus características dependen de las puntas de corriente que se tengan. Suelen ser de 1 a 3  $\Omega$  y de entre 200 a 1000 W para poder evacuar la energía calorífica generada por la corriente.

Las resistencias regulables se intercalan en serie en el circuito para mitigar las puntas de intensidad. Con ellas se puede ajustar la magnitud de la corriente. Suelen ser de pequeño valor (1 a 3  $\Omega$ ) y bastante potencia (200 a 1.000 W) para poder disipar sin dificultad la energía calorífica.

El conmutador sirve para la función marcha/paro y para intercalar el shunt de medida.

( Ver dibujos explicativos 2, 3 y 4 en el apartado 1.8.2.4. )



### 1.8.2.3. CORRIENTES VAGABUNDAS PROVENIENTES DE SISTEMAS DE CORRIENTE ALTERNA

Los efectos nocivos de las influencias de corriente alterna sobre las conducciones metálicas enterradas pueden ser:

- Problemas de seguridad para las personas. Un elevado potencial en la tubería puede ser peligroso para las personas que estén en ese momento en contacto con la misma. Para garantizar la seguridad del personal la tensión de la tubería no debe superar 50 V.
- Daños en el aislamiento de la tubería. Debido a influencias conductivas e inductivas, cuando las tensiones de la tubería exceden la rigidez dieléctrica del aislamiento pueden producirse daños en este.
- Daños en el metal de la tubería. Los efectos conductivos pueden originar perforaciones del acero de la tubería. Los lugares con mayor riesgo son aquellos donde la tubería discurre muy cerca de sistemas de puesta a tierra, especialmente de torres de muy alta tensión, de 220 y 400 kV, y de subestaciones eléctricas.
- Daños en las juntas aislantes. Las juntas aislantes pueden dañarse si la diferencia de potencial se aparece entre sus extremos supera la capacidad de aislamiento. Estos daños pueden producirse por influencias conductivas, principalmente por faltas a tierra de la línea eléctrica.
- Daños en los equipos electrónicos del sistema de protección catódica. Estos equipos pueden dañarse si aparecen sobretensiones.
- Corrosión de la tubería. Hace pocos años se consideraba que la corriente alterna no provocaba problemas de corrosión en las conducciones próximas. Actualmente se considera un hecho demostrado que la corriente alterna puede producir corrosión en estructuras metálicas vecinas y ya existe normativa para su control.

La influencia inductiva puede ser significativa cuando la distancia en metros entre la línea eléctrica y la tubería sea menor de  $200 \sqrt{\rho}$ , siendo  $\rho$  la resistividad del terreno en  $\Omega\text{m}$ .

El riesgo de corrosión es mayor en tuberías con elevados valores de resistencia de aislamiento. Cuanto mayor es el aislamiento y por tanto mejor su calidad, mayor será la tensión inducida en la tubería.

Suelos con valores bajos de resistividad permiten la circulación de elevadas corrientes desde la tubería al suelo, produciendo corrosión por corriente alterna.

Para evaluar la probabilidad de corrosión debida a tensiones de corriente alterna se deben analizar los siguientes factores:

- Tensión de corriente alterna inducida en la tubería
- Potencial OFF entre la tubería y el suelo. El potencial OFF medido varios milisegundos después del potencial ON puede dar información.
- Densidad de corriente alterna.
- Potencial ON de la tubería.
- Características del suelo.
- Corrosión de las probetas.

#### 1.8.2.3.1. DIFERENCIA DE POTENCIAL MÁXIMO ADMISIBLE POR EL REVESTIMIENTO DE LA TUBERÍA

Si se somete al revestimiento de la tubería a una diferencia de tensión suficientemente elevada ( aplicada entre el metal del tubo y el terreno que lo rodea ) puede llegar a producirse un arco voltaico que perfora el revestimiento o incluso que genere tal cantidad de calor que perfora el metal de la tubería.

El valor de la tensión máxima admisible por el revestimiento depende de los siguientes factores:

- Naturaleza y calidad del revestimiento ( rigidez dieléctrica, resistencia de fuga a tierra, uniformidad de la capa aislante, etc )
- Espesor del revestimiento
- Estado del revestimiento ( porosidad, desperfectos, etc )

Es fundamental conocer la magnitud de la diferencia de tensión que puede llegar a dañar el revestimiento de la conducción, para tomar las medidas necesarias que impidan ese riesgo. Para determinar el valor de esa diferencial de tensión se realizan ensayos en los que se van aplicando voltajes entre una tubería enterrada preparada para tal fin y una tierra de ensayo, mediante una fuente a 50 Hz.

En estos ensayos se ha observado que la resistencia del revestimiento varia no solo con la amplitud de la onda de tensión aplicada sino también con su duración. Para un valor de tensión constante entre 5 y 10 kV la corriente se triplica en un espacio de tiempo de 1 segundo y para voltajes superiores a los 10 kV la corriente se estabiliza muy rápidamente.

Para espesores de aislamiento de 3,5 a 4 mm se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Para tensiones de hasta 5 kV no se ha producido ningún daño a la tubería
- Para tensiones de entre 5 y 10 kV, al cabo de 1 segundo se producen daños en la tubería pero no llega a producirse perforación
- Para tensiones de 15 kV la tubería se perfora en menos de 1 segundo

Se debe tener en cuenta que la tensión de prueba del revestimiento que se realiza mediante escoba eléctrica antes de proceder al enterramiento de la tubería es de 10 KV, pero tras el enterramiento se produce una degradación del aislamiento con el paso del tiempo, la humedad del terreno, etc.

En la tabla siguiente pueden verse las tensiones máximas admisibles para tuberías de acero al carbono con revestimiento de polietileno extruido

Diámetro ( pulgadas )	Tipo de revestimiento	Espesor del revestimiento	Tensión máxima ( kV )
16" a 26"	Normal	2,5	5
	Reforzado	3	5,5
	Extrarreforzado	3,5	6
	Doble	5	7
3" a 14"	Normal	2	4
	Reforzado	2,5	4,5
	Extrarreforzado	3	5
	Doble	4	6
2"	Normal	1,8	3
	Reforzado	2,5	3,5
	Extrarreforzado	3,5	4
	Doble	NA	NA

Cuando se encuentra el caso de que las tensiones por estas influencias sean superiores a las máximas admisibles se aplica la más ventajosa de estas dos soluciones:

- Modificar el trazado aumentando las distancias de separación hasta conseguir tensiones inferiores a las máximas admisibles.
- Aumentar el espesor del revestimiento aislante,

Para reforzar el revestimiento en la zona de riesgo, se le aplican dos o incluso tres capas de aislante. Dicho refuerzo se realiza en campo, revistiendo con cinta solapada al 50 %.

#### 1.8.2.3.2. INFLUENCIAS DEBIDAS A LINEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN

Debido a la cercanía de una línea eléctrica de alta tensión puede producirse alguna de las siguientes afecciones:

- Cruce del trazado de la conducción metálica enterrada con la línea eléctrica.
- Paralelismo de varios kilómetros entre la conducción y la línea eléctrica.
- Aproximación de la conducción a una subestación o central eléctricas.

La influencia más negativa para la tubería es la conductiva, que puede provocar incluso la perforación del metal. Pero para el estudio del fenómeno de la corrosión hemos de fijarnos en los efectos provocados por la influencia inductiva en sus diferentes formas.

## INFLUENCIA INDUCTIVA

Se produce cuando la tubería metálica enterrada tiene un paralelismo o discurre con cierta oblicuidad respecto a una línea eléctrica durante varios kilómetros. Se trata de un acoplamiento inductivo entre ambas conducciones que produce en los extremos del tramo de tubería próximo a la línea eléctrica una tensión inducida.

Pueden distinguirse dos tipos de influencias inductivas:

- **Influencia momentánea.** Cuando el defecto de la línea eléctrica (cortocircuito, sobretensión, contorneo del arco, etc.) es de breve duración. Este defecto influye aunque se produzca fuera del tramo paralelo a la tubería.
- **Influencia prolongada.** Se produce de forma permanente durante el funcionamiento normal de la línea eléctrica, debido al acoplamiento inductivo con la tubería. La tensión inducida en la tubería no alcanza un valor alto, pero el hecho de producirse de forma permanente puede traer consigo graves consecuencias de seguridad para las personas y de corrosión del tubo por corrientes alternas.

Aunque la línea eléctrica esté equilibrada y la suma vectorial de las intensidades de sus fases sea cero, la variación del flujo magnético producida por la propia corriente alterna de régimen de la línea eléctrica o por la elevación rapidísima del valor de la intensidad que circula por la línea eléctrica debido a un cortocircuito, por ejemplo, pueden provocar la inducción de una fuerza electromotriz inducida en una conducción metálica enterrada próxima debido a la diferente distancia que la separa de cada uno de los conductores de la línea. Se han llegado a medir tensiones de 50 V, lo cual puede ser peligroso para las personas. Esta fuerza electromotriz inducida en la tubería por efecto de las líneas eléctricas de alta tensión provoca una circulación de corriente en la tubería. Además, se establece una diferencia de potencial entre el terreno y el metal, separados por el revestimiento aislante de la tubería.

La magnitud de la f.e.m inducida anteriormente citada dependerá de los siguientes factores:

- Intensidad de la corriente inductora, que a su vez depende de la impedancia existente entre el punto de fallo y la central o subestación.
- Distancia entre la línea y la tubería.
- Longitud del paralelismo o aproximación entre línea eléctrica y tubería metálica.
- Coeficiente de inducción mutua entre la línea eléctrica afectante y la tubería enterrada. Este coeficiente varía mucho con la distancia existente entre las dos conducciones y la resistividad del terreno que las separa.
- Resistencia longitudinal e impedancia inductiva de la tubería.
- En el caso de aproximación oblicua también influye el ángulo que forman los trazados de la línea eléctrica y la tubería.

Para poder realizar un cálculo estimativo del valor del potencial inducido en la tubería partimos de las siguientes hipótesis:

- La tubería y la línea eléctrica discurren paralelas
- El revestimiento aislante es homogéneo y por tanto su resistencia específica constante en todo el tramo de tubo afectado.

- La resistividad del terreno es constante en todo el tramo de afección. Dada la imposibilidad de que se dé esta circunstancia, se toma el valor más desfavorable y en el caso de que haya gran variación de este valor por tratarse de terrenos muy dispares se fracciona el tramo en subtramos de resistividad similar.

- En el caso de influencia momentánea considerar que el defecto de la línea se produce fuera del tramo paralelo con la tubería, que es lo más probable.

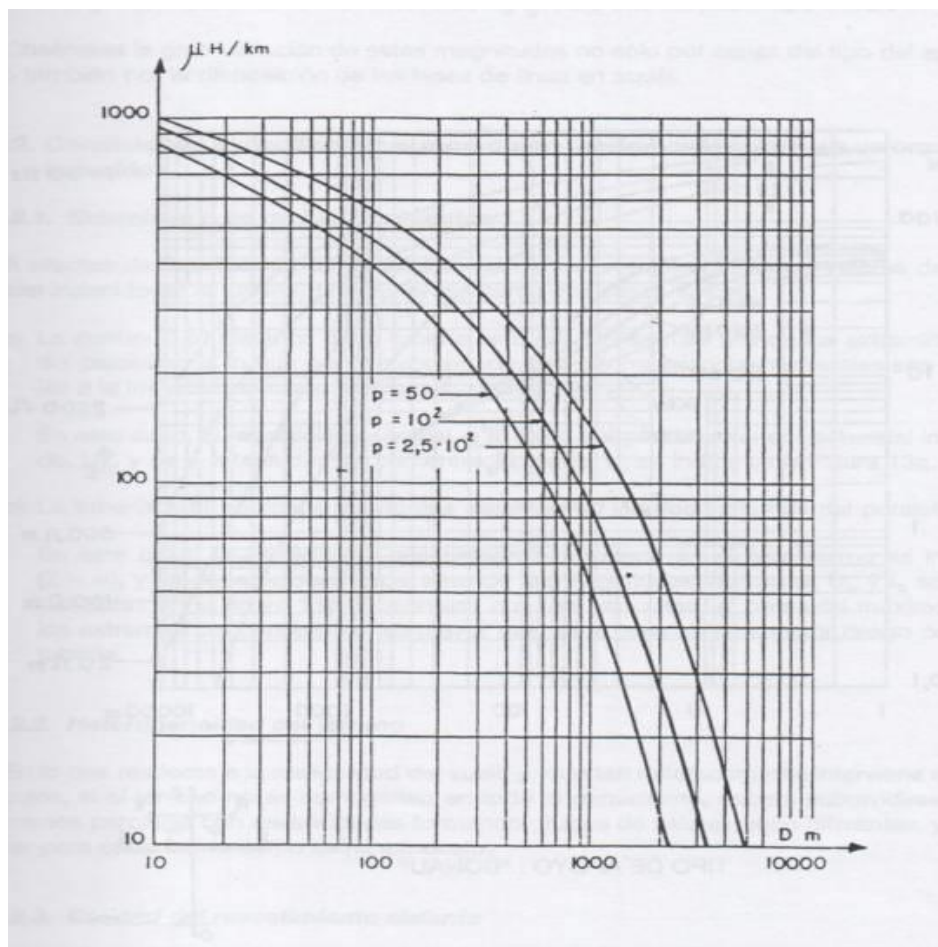
- Se considera el origen en el centro del paralelismo

En un punto determinado, el potencial inducido en la tubería respecto al terreno vendrá dado por la ecuación :

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -(R' + j\omega L')I + j\omega M' I_d$$

siendo  $I_d$  la corriente inductora de la línea y  $M'$  el coeficiente de inducción mutua por km.

Este último se obtiene de la siguiente tabla:



Se toma como origen de coordenadas el punto medio del paralelismo y se resuelve la ecuación anterior

$$U = \frac{j\omega M' I_d}{2\gamma} \left[ e^{-\gamma \left( \frac{L}{2} - x \right)} - e^{-\gamma \left( \frac{L}{2} + x \right)} \right]$$

$\gamma$  : constante de propagación de la tubería.  $\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}$

La intensidad del campo por unidad de longitud es

$$|E| = 2\pi f M' |I_d|$$

donde  $f$ : frecuencia de la red eléctrica.

$$\omega = 2\pi f \text{ rad/seg.}$$

Algunos autores introducen en la fórmula un coeficiente que se aplica suponiendo que no se dan todas las circunstancias desfavorables. Su valor más utilizado es 0,7.

Utilizando los módulos de las diferentes magnitudes tenemos

$$|U| = \frac{|E|}{2|\gamma|} \frac{|e^{\gamma x}|}{|E^{\frac{L}{2}}|} |(1 - e^{2\gamma x})|$$

El potencial máximo inducido en los extremos del tramo paralelo lo obtenemos haciendo  $x = L / 2$ , y queda:

$$|U_{\text{máx}}| = \frac{|E|}{2|\gamma|} |(1 - e^{-\gamma L})|$$

siendo:

$|U_{\text{máx}}|$  = módulo de la tensión máxima inducida en los extremos del tramo paralelo.

$|E|$  = módulo de la fuerza electromotriz inducida, por km ( KV/km )

$|\gamma|$  = módulo de la constante de propagación

$L$  = longitud del tramo paralelo, en km.

El valor de la tensión eléctrica  $E$  depende de la intensidad inducida  $I$  ( kA ), del coeficiente de inducción mutua  $M$  (  $\mu\text{H} / \text{km}$  ) y de la frecuencia de la red .

En el caso de que la línea eléctrica posea cable de guarda el cálculo resulta excesivamente complejo debido al efecto de doble pantalla y retorno.

En definitiva, todo paralelismo con una línea eléctrica, sobre todo si intervienen varios apoyos, constituye un riesgo para una conducción metálica enterrada próxima, que pueden sufrir los efectos de conducción e inducción simultáneamente.

En este caso para realizar el cálculo del potencial inducido en la tubería se debe acotar por tramos, entre vértices del tubo y cuando se compruebe que existe un cambio significativo de la resistividad.

## INFLUENCIA CONDUCTIVA

Cuando en un apoyo de una línea eléctrica o en una subestación se produce un defecto a tierra, en el terreno se observa un aumento de la diferencia de potencial respecto a una instalación próxima que tomemos como referencia. Los fenómenos que pueden llevar a esta situación son:

- Corrientes de desequilibrio de sistemas trifásicos con el neutro puesto a tierra
- Caídas de rayos sobre los conductores aéreos.

En el caso de que esto suceda en las proximidades de una tubería metálica enterrada, se establece una diferencia de potencial elevada entre el terreno y el metal, separados por el revestimiento del tubo que también se puede transmitir a puntos de la tubería alejados del lugar del fallo, como juntas aislantes, rectificadores de las Estaciones de Protección Catódica, tomas de potencial, etc., pudiendo originar perforaciones de las juntas aislantes o fallos en los rectificadores. También pueden aparecer tensiones de paso y contacto peligrosas para las personas.

La magnitud de la diferencia de potencial depende de los siguientes factores:

- $X$  = distancia entre la tubería y el punto de defecto a tierra de la corriente eléctrica
- Duración de la anomalía
- $\rho$  = resistividad del terreno
- $P_{cc}$  = potencia de cortocircuito de la estación alimentadora de la línea eléctrica
- $d$  = distancia entre el apoyo de línea con defecto a tierra y su estación alimentadora
- $Z$  = impedancia interpuesta por la línea entre el apoyo y la estación alimentadora
- $R_p$  = resistencia de tierra del apoyo
- si la línea está o no equipada con cable de guarda
- si la línea está conectada a una o dos fuentes de alimentación por sus extremos

En el caso de que la derivación a tierra se produzca en una subestación los efectos pueden ser incluso mayores al no existir la impedancia de línea  $Z$ .

Un factor importante es la duración del defecto a tierra, ya que este puede producirse por una falta de aislamiento breve debida a las condiciones atmosféricas o por una derivación más duradera. Para minimizar los efectos de estas derivaciones a tierra, las líneas eléctricas se protegen de forma que el problema dura solo entre 0,04 y 0,16 segundos.

### Cálculos de las influencias conductivas

El cálculo de la magnitud de las influencias es muy complicado debido a que se han de tener en cuenta factores de difícil cuantificación, como son las intensidades de fuga a tierra o la resistencia del circuito que va a atravesar dicha corriente, que estará compuesto por terrenos de distintas resistividades.

Como se ha comentado anteriormente, cuando se produce un defecto a tierra en un apoyo eléctrico o subestación, el terreno del entorno sufre un aumento del potencial respecto a un electrodo distante, por ejemplo una conducción metálica.

Para poder realizar los cálculos suponemos que el terreno interpuesto entre el apoyo eléctrico afectante y la tubería es homogéneo. El potencial va disminuyendo desde el punto de inyección de corriente al suelo de forma isótropa, es decir, existen unas esferas equipotenciales cuyo centro es el punto de fuga de intensidad a tierra ( simetría esférica ).

El valor de la resistencia a tierra del apoyo, en ohmios, es:

$$R_p = \frac{\rho}{2\pi r}$$



siendo  $\rho$  = la resistividad del terreno, en ohmios x metro

$r$  = radio de la esfera equivalente de la resistencia del terreno considerando dispersión radial de la corriente por tierra, en metros.

El potencial en el pie del apoyo respecto a una tierra lejana es:

$$Up = I \cdot Rp = I \frac{\rho}{2\pi r}$$

siendo  $I$  la intensidad de corriente de defecto a tierra, en amperios.

El valor de este potencial  $Vp$  disminuye al aumentar la distancia existente entre el punto de defecto a tierra y la subestación alimentadora.  $Vp$  alcanza su valor máximo si la fuga se produce junto a la subestación.

El potencial del suelo a una distancia  $x$  del apoyo es:

$$Ux = I \cdot Rx = I \frac{\rho}{2\pi x} = \frac{Up}{Rp} \frac{\rho}{2\pi x}$$

*[ Fórmula 4, empleada en el Documento 2, Cálculo de influencias conductivas ]*

Siendo  $Rx$  la resistencia interpuesta por el terreno a la distancia  $x$ .

Dado que se considera terreno homogéneo la resistividad es constante y el potencial  $Ux$  decrece según una función hiperbólica.

*( Ver dibujo explicativo nº 5 en el apartado 1.8.2.4. )*

En terrenos no homogéneos se ha experimentado que la variación ( decrecimiento ) del potencial con la distancia es mucho más rápida si el terreno en cuestión está formado por una primera capa superficial de aproximadamente 1 metro de profundidad con resistividad del orden de 300  $\Omega m$  y a partir de esa profundidad una resistividad de menor valor, de unos 100  $\Omega m$ . Se comprobó que en estas condiciones, a una distancia de 10 m del eje del apoyo el potencial era tan sólo el 15 % de la tensión del apoyo.

La intensidad de defecto  $I$  por su parte depende de la potencia de cortocircuito de la central o subestación a la que pertenece la línea y de la impedancia de los cables entre el apoyo que tiene el fallo y la central o subestación. La intensidad de defecto disminuye con la distancia. Es por esto que la intensidad de defecto máxima se produce en el apoyo más cercano a la subestación.

La resistencia de tierra del apoyo (  $Rp$  ) depende de la resistividad del terreno en el que aquel está anclado y de las dimensiones de la base.

Los valores de  $Up$ ,  $I$  y  $Rp$  se solicitan a las compañías propietarias de las líneas. A continuación se muestra una tabla en la que figuran los valores de  $Up$ ,  $I$  y  $Rp$  para las tensiones nominales usuales de las líneas eléctricas de alta tensión. Estos valores corresponden a los apoyos más próximos a la central o subestación, que son los casos más desfavorables



Tensión Nominal ( kV )	Resistencia del apoyo Rp ( $\Omega$ )	Tensión máxima de defecto en el apoyo Vp ( kV )	Intensidad de cortocircuito Icc ( kA )	Intensidad de defecto en el apoyo I ( kA )
380	20	208	40	10,4
	10	188		18,8
	3	100		33,34
220	20	113	30	5,7
	10	103		10,3
	3	55		18,34
132	20	69,5	25	3,5
	10	64		6,4
	3	43		14,35
66	20	37	20	1,87
	10	35		3,5
	3	26		8,67
45	20	23,9	15	1,19
	10	22		2,2
	3	15		5
30	20	13,4	10	0,67
	10	10		1
	3	6		2
20 ... 13,2	20	8,77	8	0,43
	10	7		0,7
	3	4		1,34

Para otros valores de la resistencia a tierra del apoyo Rp se puede interpolar. Estas intensidades de cortocircuito son nominales en barras de la subestación

Una consideración importante a realizar es si la línea está dotada de cable de guarda. La instalación de este cable reduce en gran proporción la corriente dispersada a tierra por el apoyo que sufre el defecto, debido a los dos efectos siguientes:

- Una parte de la corriente de defecto retorna por el cable de guarda. La magnitud de la I de retorno dependerá de las impedancias del apoyo y del cable de guarda.
- Se produce una autoinducción mutua entre el cable de guarda y el de fase. Como consecuencia se genera una I en el circuito formado por el cable de guarda, los apoyos y tierra. El sentido de esta corriente generada por el acoplamiento electromagnético es opuesto al de la corriente de defecto del apoyo, contribuyendo a

reducir esta última.

La compañía Electricité de France registró los valores que se indican a continuación y que indican el claro efecto que tiene el cable de guarda en la reducción de los potenciales que llegan a una tubería enterrada en caso de defecto a tierra de un apoyo de una línea eléctrica de alta tensión, lo que permite reducir la separación entre el tubo metálico y la línea sin riesgo para el revestimiento del primero.

Tensión ( kV )	Resistividad del suelo ( $\Omega$ m )	Resistencia de tierra del apoyo ( $\Omega$ )	Corriente máxima cortocircuito I <sub>cc</sub> ( kA )	Distancia tubería-línea		Factor de reducción
				Sin cable de guarda	Con cable de guarda	
380	1000	30	40	200	50	0,25
	300	10		170	35	0,2
	10	3		120	25	0,2
220	300	15	30	110	20	0,18
	60	3		90	18	0,2
70	300	25	10	30	15	0,5

Tensión máxima en la tubería = 5 kV

En la práctica, el criterio es el de adoptar un coeficiente de reducción de 0,6. A la vista de los datos de la tabla anterior se trata de un factor muy conservador, pero ante la incertidumbre de los parámetros que se manejan se opta por dar un margen de seguridad amplio.

$K_1$  : Coeficiente a aplicar teniendo en cuenta si la línea posee cable de tierra o guarda.

Con cable de acero,  $K_1 = 0,9$

Con cable Acero/Aluminio,  $K_1 = 0,6$

Si no hay cable de tierra,  $K_1 = 1$

$K_2$ : Coeficiente de alimentación simple o doble de la línea eléctrica

Simple alimentación :  $K_2 = 1$

Doble alimentación :  $K_2 = 1,3$

Por los ensayos realizados se considera que este es un método bastante conservador.

No se toman en consideración las influencias eléctricas por conducción debidas a líneas eléctricas y estaciones alimentadoras que trabajen con tensiones inferiores a 15 KV, para las que se fija la distancia de seguridad en 10 m.

## INFLUENCIA CAPACITIVA

El tubo enterrado y próximo a una línea eléctrica tiene semejanzas con un condensador eléctrico. Las armaduras son el terreno y el metal de la tubería y el dieléctrico el revestimiento aislante.

El campo eléctrico provocado por la línea y que atraviesa a la tubería produce un potencial entre el terreno y el acero de la conducción.

Aunque los efectos son de escasa importancia cuando la conducción está en servicio, sí se debe tener en cuenta durante la construcción, dado que los tubos soldados, formando tramos de varios kilómetros, descansan sobre calzos a la espera de ser situados en el fondo de la zanja. No es extraño que el metal de la tubería adquiera un alto potencial respecto a tierra por efectos capacitivos, sobre todo en ambientes de sequedad. Este fenómeno es un riesgo real que ha provocado algunas muertes. Un método sencillo para evitarlo es el poner a tierra los diferentes tramos de tubería.

## INFLUENCIA DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS SUBTERRÁNEAS DE ALTA TENSION

En principio hay que pensar que este tipo de conducciones no provocan influencias de consideración, dado que las distancias entre los conductores son muy pequeñas, los aislantes muy buenos y la pantalla metálica se pone a tierra, actuando como jaula de Faraday que aísla los efectos eléctricos con el exterior.

### 1.8.2.3.3. SOLUCIONES PARA MITIGAR LA INFLUENCIA DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS

En el caso de que por las particularidades del terreno no puedan mantenerse esas separaciones de seguridad entre la tubería y los apoyos eléctricos, se aplican soluciones excepcionales, como por ejemplo:

- Alejamiento de las puestas a tierra de los apoyos de la línea eléctrica afectante en la dirección normal a la tubería
- Aumento ( dentro de los límites permitidos por la reglamentación ) de la resistencia de tierra de los apoyos.
- Conexión de las puestas a tierra de los apoyos eléctricos afectantes con los adyacentes, más alejados de la tubería.
- Instalación de puestas a tierra con ánodos reactivos en el tramo de tubería afectado por influencias inductivas
- En tramos con influencias inductivas, instalar vainas metálicas que contengan en su interior a la tubería, aislada mediante separadores de alta rigidez dieléctrica.
- Dotar a la tubería de un revestimiento reforzado cuyo espesor le otorgue la suficiente rigidez dieléctrica para soportar la diferencia de potencial que pueda aparecer.
- Instalación de cables de control del gradiente, con UDCA asociadas.

### Cables de control del gradiente de tensión

Se emplean para combatir influencias por conducción e inducción y cuando se detecta la existencia de potenciales permanentes de corriente alterna.

El sistema consiste en la instalación de dos conductores desnudos, de cobre o zinc, enterrados paralelos y próximos a la tubería ( entre 20 y 40 cm de separación ), uno

a cada lado de esta. Se conectan a la tubería a través de un dispositivo de desacoplo.

( Ver dibujo explicativo nº 6 en el apartado 1.8.2.4. )

Si se emplean conductores de zinc, estos proporcionan protección catódica y pueden conectarse directamente a la tubería. En este caso debe tenerse en cuenta que los conductores se van a consumir y deberán ser sustituidos a largo plazo.

Este sistema mitiga los riesgos por conducción e inducción en el tubo debido a que iguala las diferencias de potencial entre la tubería y el terreno.

Los cables paralelos deben conectarse a la tubería a intervalos regulares de entre 150 y 300 m, si es posible haciendo coincidir esas conexiones con cambios de dirección del trazado.

En los puntos de conexión a la tubería elegidos los dos cables paralelos se unen entre sí y a otro conductor aislado que se lleva a una caja denominada UDCA ( Unidad de Drenaje de Corriente Alterna ). Esta UDCA constituye un descargador de rayo y sobretensiones y desacopla la corriente continua de la alterna para evitar influencias en el sistema de protección catódica de la tubería, drenando permanentemente, a través de la puesta a tierra, la corriente alterna existente.

En el caso de que exista alguna junta aislante dentro de un tramo de tubería en riesgo, en este punto se realiza una conexión a los cables desnudos paralelos con un conductor aislado que se lleva a la TPE de la junta aislante y se une a la borna de tierra correspondiente. El cable de la puesta a tierra de la pica de la TPE puede quedar unido a la nueva puesta a tierra.

Cuando en el tramo de tubería en riesgo exista una vaina (tubo de protección ) los cables paralelos en el paso de la vaina serán aislados y de la misma longitud que aquella, pudiendo ir alojados dentro o fuera de la vaina.

Las características de los cables son:

- Cables paralelos de guarda: cobre rígido desnudo 1 x 50 mm<sup>2</sup>
- Cables paralelos de guarda, paso por vaina: cobre flexible aislado 1 x 50 mm<sup>2</sup>  
RV 0,6 / 1 kV
- Cable de tierra de unión a cables paralelos: cobre flexible aislado 1 x 35 mm<sup>2</sup>  
1 kV
- Cable de conexión a la tubería: cobre flexible aislado 1 x 25 mm<sup>2</sup> RV 0,6 / 1 kV

#### 1.8.2.4. DIBUJOS EXPLICATIVOS

- Corrientes vagabundas producidas por ferrocarril electrificado y su eliminación mediante drenajes
- Corrientes vagabundas producidas por un sistema de protección catódica y su eliminación mediante drenaje
- Eliminación de zonas de afección por sistema de protección catódica mediante ánodos de sacrificio y apantallamiento
- Esquema de conexiones y elementos constituyentes de un drenaje
- Corrientes vagabundas por derivación a tierra de un apoyo eléctrico
- Mitigación de corrientes vagabundas de corriente alterna mediante UDCA

### **1.8.3. ALTERNATIVAS AL PROYECTO**

## INDICE DEL ANEXO 1.8.3. ALTERNATIVAS AL PROYECTO

1.8.3.1.	CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE PROTECCIÓN POR ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE .....	83
1.8.3.2.	PROTECCIÓN DE LA TUBERÍA MEDIANTE ÁNODOS REACTIVOS .....	85
1.8.3.3.	UTILIZACIÓN DE LECHOS ANODICOS PROFUNDOS .....	87
1.8.3.4.	UBICAR LA EPC DEL TRAMO LUMBIER – EZPERUN CENTRADA EN LA TRAZA DEL GASODUCTO .....	87

### 1.8.3.1. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE PROTECCIÓN POR ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE

Tal como se dice en el Documento 2. CALCULOS en su punto 2.1 el método de cálculo empleado para determinar el potencial y la corriente de inyección necesaria para la protección del gasoducto es el de atenuación del potencial, en el que se calculan todos los parámetros que intervienen en el circuito eléctrico.

Dado que en ese circuito eléctrico formado por ánodos, terreno, revestimiento de la tubería... muchos de ellos son de difícil ponderación y que el sistema permite el ajuste de los parámetros de intensidad y voltaje si las EPC están suficientemente dimensionadas, no es infrecuente realizar el cálculo de la intensidad necesaria por estimación a partir de la densidad de corriente, obtenida de las tablas a partir de la agresividad del terreno y la calidad del revestimiento de la tubería.

Aplicando este segundo criterio el cálculo sería el siguiente:

Partimos de la superficie enterrada del gasoducto, calculada en el documento 2. CALCULOS, punto 2.1. ATENUACIÓN DEL POTENCIAL

Tramo de gasoducto	Superficie
Lumbier – Ezperun	37.850 m <sup>2</sup>
Ezperun – Beriain	9.613 m <sup>2</sup>
Ezperun - Urroz	12.821 m <sup>2</sup>
Superficie total .....	60.284 m <sup>2</sup>

La tabla de densidad de protección indica que para acero al carbono bien revestido con polietileno extruido, que es el caso de la tubería proyectada, la densidad de protección para revestimiento nuevo ha de ser de 0.01 mA/m<sup>2</sup> y para revestimiento envejecido 0.1 mA/m<sup>2</sup>. Dicha tabla puede verse en el ANEXO 1.8.1. PROTECCIÓN CATÓDICA.

Tomando como dato esa densidad de corriente se calcula la intensidad en cada tramo de gasoducto y con las dos calidades de revestimiento:

Las densidades de corriente de cada tramo serán:

$$J = \frac{I}{S}$$

Por tanto, las intensidades a inyectar serán

$$I = J \cdot S$$

Tramo Lumbier – Ezperun

Con revestimiento nuevo:  $I = 0,01 \cdot 37850 = 379 \text{ mA}$

Con revestimiento envejecido:  $I = 0,1 \cdot 37850 = 3785 \text{ mA}$

Tramo Ezperun – Beriain

Con revestimiento nuevo:  $I = 0,01 \cdot 9613 = 96 \text{ mA}$

Con revestimiento envejecido:  $I = 0,1 \cdot 9613 = 961 \text{ mA}$

Tramo Ezperun – Urroz

Con revestimiento nuevo:  $I = 0,01 \cdot 12821 = 128 \text{ mA}$

Con revestimiento envejecido:  $I = 0,1 \cdot 12821 = 1282 \text{ mA}$

Total gasoducto Lumbier - Beriain – Urroz

Con revestimiento nuevo:  $I = 0,01 \cdot 60.284 = 602 \text{ mA}$

Con revestimiento envejecido:  $I = 0,1 \cdot 60.284 = 6028 \text{ mA}$

Se trata de un método rápido pero no deja de ser una estimación. Los valores calculados de forma exhaustiva en el Documento 2. CALCULOS son los siguientes

Tramo Lumbier – Ezperun

Con revestimiento nuevo:  $I = 950 \text{ mA}$

Con revestimiento envejecido  $I = 5170 \text{ mA}$

Tramo Ezperun - Beriain

Con revestimiento nuevo:  $I = 220 \text{ mA}$

Con revestimiento envejecido  $I = 920 \text{ mA}$

Tramo Ezperun -Urroz

Con revestimiento nuevo:  $I = 300 \text{ mA}$

Con revestimiento envejecido  $I = 1240 \text{ mA}$

La corriente total inyectada ha de ser:

Con revestimiento nuevo:  $I = 1470 \text{ mA}$

Con revestimiento envejecido  $I = 7330 \text{ mA}$



## CONCLUSIÓN:

Con revestimiento nuevo

Corriente total calculada por el método empleado en el Proyecto:	1,47 A
Corriente total calculada por el método alternativo:	0,60 A

Con revestimiento envejecido

Corriente total calculada por el método empleado en el Proyecto:	7,33 A
Corriente total calculada por el método alternativo:	6,03 A

La intensidad calculada por el método estimativo de la densidad es sensiblemente menor en porcentaje a la calculada por el método exhaustivo, pero con las intensidades con las que se trabaja en estos sistemas y si las Estaciones de Protección Catódica tienen margen de potencia, estas diferencias se pueden ajustar posteriormente.

### 1.8.3.2. PROTECCIÓN DE LA TUBERÍA MEDIANTE ÁNODOS REACTIVOS

Este método supone la distribución a lo largo de la traza del gasoducto de un determinado número de ánodos en lugar de realizar la inyección de la corriente de protección desde Estaciones de Protección Catódica.

La propia Norma UNE 12954 dice que como regla general los ánodos galvánicos sólo se pueden usar económicamente para estructuras con una demanda pequeña de corriente de protección y cuando no exista un suministro eléctrico o cuando este se pueda conseguir sólo con un gran coste.

Con el fin de realizar la medición de los potenciales a interrupción de corriente y de la corriente del ánodo, los ánodos galvánicos deben conectarse a la tubería a través de las tomas de potencial.

No son adecuados para su utilización en áreas con interferencia de corriente continua y/o interferencias permanentes de corriente alterna.

Se han seleccionado ánodos de magnesio U-4.1 de alto potencial, que aportan – 1,75 V respecto al electrodo de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub>,

Las dimensiones de estos ánodos son:

Longitud = 55 cm      Radio = 3,76 cm

Se calcula la resistividad media del trazado, que es  $\rho = 6369 \Omega \text{ cm}$

La intensidad que libera un ánodo se calcula por la ley de Ohm:

$$I_a = \frac{V}{R}$$

Siendo V la diferencia entre el potencial natural del metal de sacrificio y el potencial del acero protegido:

$$V = 1,75 - 0,85 = 0,9 \text{ V}$$

Para calcular la resistencia a tierra de un ánodo enterrado en posición vertical utilizamos la siguiente fórmula enunciada por Dwight:

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{8L}{d} - 1 \right)$$

$$R_v = \frac{6369}{2\pi 55} \left( \ln \frac{8 \cdot 55}{7,52} - 1 \right) = 56,61 \, \Omega$$

Y la intensidad aportada por un ánodo será

$$I_a = \frac{0,9}{56,61} = 0,016 \, A$$

Para este tipo de instalación la intensidad total necesaria para proteger la tubería se calcula a partir de la densidad de corriente estimada y del cálculo de la superficie de la estructura. Estos datos ya están calculados en la ALTERNATIVA 1:

$$J = 0,1 \, \text{mA/m}^2, \text{ Superficie} = 60.284 \, \text{m}^2, \, I = 0,6 \, A$$

Número de ánodos necesarios para proteger la tubería:

$$N = \frac{I}{I_a} = \frac{0,6}{0,016} = 37,5$$

Son necesarios 38 ánodos.

Se debe tener en cuenta que cada uno de esos 38 ánodos han de tener asociada una toma de potencial. Dado que el proyecto contempla la instalación de 30 tomas de potencial entre simples y especiales, haría falta instalar 8 tomas de potencial más en caso de aplicar esta alternativa.

## CONCLUSIÓN:

En principio es posible realizar la protección mediante este método, pero se debe tener en cuenta que se trata de un sistema que no reacciona ante las corrientes vagabundas, con lo que si estas aparecen sus efectos pueden dejar desprotegidas zonas del gasoducto. Además la vida de los ánodos es mucho menor que la de los lechos anódicos actuales de las EPCs, que prácticamente funcionan como un electrodo que transfiere la corriente de protección al terreno sin perder apenas material.

### 1.8.3.3 UTILIZACIÓN DE LECHOS ANÓDICOS PROFUNDOS

Se ha optado por instalar lechos horizontales frente a profundos debido a que económicamente no existe diferencia entre la instalación de unos u otros y la única ventaja de los verticales es que ocupan menos terreno dado que la excavación es en pozo, pero a medio plazo resultan menos fiables en cuanto a que algún ánodo deje de suministrar corriente y su reparación es muy gravosa.

### 1.8.3.4. UBICACIÓN DE LA EPC DEL TRAMO LUMBIER – EZPERUN CENTRADA EN LA TRAZA EN LUGAR DE INSTALARLA EN UN EXTREMO.

La opción de instalar la EPC1 centrada en el tramo Lumbier – Ezperun es plausible desde el punto de vista de que necesitaría alimentar ramales más cortos, pero en los cálculos se ha demostrado que la EPC protege totalmente a la tubería y el ubicar la EPC fuera de la Estación de Compresión obligaría a llevar alimentación eléctrica hasta ella o dotarla de un sistema de alimentación alternativo.

Pamplona, 31 de agosto del 2.014

Carlos Ramírez Ballabriga

## DOCUMENTO 2 . CALCULOS

## INDICE DEL DOCUMENTO 2 . CALCULOS

2.1. CRITERIOS DE PROTECCIÓN DE LA TUBERÍA .....	90
2.2. ATENUACIÓN DEL POTENCIAL .....	91
2.3. POTENCIALES EN LOS PUNTOS DE INYECCIÓN .....	94
2.4. CORRIENTE DE INYECCIÓN NECESARIA .....	95
2.5. LECHOS ANODICOS .....	97
2.6. INFLUENCIAS CONDUCTIVAS POR LINEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN .....	104

## 2.1. CRITERIOS DE PROTECCIÓN DE LA TUBERÍA

Los cálculos que se dan a continuación están basados en los siguientes puntos de partida:

- El sistema de protección catódica que se va a emplear es de corriente impuesta.
- El método de cálculo empleado es el de atenuación del potencial a medida que nos alejamos del punto de inyección de corriente.
- Características de las tuberías:  
Material: acero al carbono  
Resistividad del acero,  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-7} \Omega \text{ m}^2/\text{m}$

TRAMO	Diámetro Nominal ( " )	Diámetro Exterior ( mm )	Espesor ( mm )	Longitud ( m )
Lumbier – Ezperun	20	508,0	7,1	23.656
Ezperun – Beriain	14	355,6	6,4	8.507
Ezperun - Urroz	14	355,6	6,4	11.346

- Características del revestimiento:

Material: polietileno extruido

Recubrimiento: normal

Espesor: 2,5 mm

Resistencia específica para atenuación:  $r_u = 20.000 \Omega \text{ m}^2$  ( para revestimiento nuevo)  
 $r_u = 5.000 \Omega \text{ m}^2$  (para revestimiento viejo)

La inspección del revestimiento antes y durante el montaje será muy estricta y se asegurará la reparación de los eventuales daños durante el transporte y manejo.

Criterio de protección:

- los potenciales se refieren al Electrodo de Cobre/Sulfato de cobre
- potencial espontáneo del acero en el terreno: -0,55 V
- potencial mínimo para asegurar la protección: -1 V de potencial OFF ( interrupción de la corriente de protección ).
- potencial mínimo permitido para no perjudicar la adherencia del revestimiento en el punto de inyección: - 3 V

Según lo anterior,

- incremento de potencial mínimo absoluto para asegurar la protección en los extremos del gasoducto

$$\Delta E_I = -1 - (-0,55) = -0,45 \text{ V}$$

- incremento de potencial máximo absoluto permitido en el punto de inyección;

$$\Delta E_o = -3 - (-0,55) = -2,45 \text{ V}$$

## 2.2. ATENUACIÓN DEL POTENCIAL

Tal como se ha expuesto en el punto ESTUDIO MATEMÁTICO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA EN TUBERIAS EMPLEANDO EL MÉTODO DE CORRIENTE IMPUESTA del ANEXO 1.8.1, a medida que va aumentando la distancia desde el punto de inyección de la corriente de protección el potencial de la tubería se va haciendo menos negativo según una curva exponencial. Este aumento del potencial viene determinado por el factor de atenuación que más tarde se va a calcular, que depende de las resistencias eléctricas del revestimiento y del metal de la tubería. Es por esto que existe una gran diferencia en el comportamiento del potencial cuando la tubería tiene el revestimiento nuevo y cuando este ha envejecido. Cuanto menor sea la resistividad del revestimiento, mayor será la atenuación del potencial y más corriente eléctrica habrá que inyectar a la tubería para alcanzar los valores de potencial de protección.

Lo primero que ha de calcularse son las resistencias eléctricas del revestimiento y de la tubería, para con estos valores hallar el factor de atenuación de cada tramo del gasoducto tanto con revestimiento nuevo como cuando ha envejecido. El sistema ha de diseñarse para las peores condiciones, de forma que los parámetros a utilizar para dimensionar las Estaciones de Protección Catódica y los lechos anódicos serán considerando el revestimiento envejecido.

#### SUPERFICIE LATERAL

$$S_{lat.} = \pi \cdot \varnothing_{exterior} \cdot Longitud$$

$$S_{lat.} \text{ tubo de } 20" = \pi \cdot 0,51 \cdot 1000 = 1.600 \text{ m}^2/\text{km}$$

$$S_{lat.} \text{ tubo de } 14" = \pi \cdot 0,36 \cdot 1000 = 1.130 \text{ m}^2/\text{km}$$

#### Superficies

$$\text{Gasoducto Lumbier – Ezperun: } S = 23,656 \cdot 1600 = 37.849,6 \text{ m}^2$$

$$\text{Para cálculos se considera } S = 37.850 \text{ m}^2$$

$$\text{Gasoducto Ezperun – Beriain: } S = 8,507 \cdot 1130 = 9.612,9 \text{ m}^2$$

$$\text{Para cálculos se considera } S = 9.613 \text{ m}^2$$

$$\text{Gasoducto Ezperun – Urroz: } S = 11,346 \cdot 1130 = 12.821,0 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie total: } 37.850 + 9.613 + 12.821 = 60.284 \text{ m}^2$$

#### SUPERFICIE TRANSVERSAL

$$S_t = \frac{\pi}{4} (\varnothing_{ext}^2 - \varnothing_{int}^2)$$

Para  $\varnothing$  exterior = 20 " y 7,1 mm de espesor:

$$S_t = \frac{\pi}{4} (508^2 - (508 - 2 \cdot 7,1)^2) = 11.172,73 \text{ mm}^2$$

Para cálculos se considera  $S_t = 11.173 \text{ mm}^2$

Para  $\varnothing$  exterior = 14 " y 6,4mm de espesor:

$$St = \frac{\pi}{4} (355,6^2 - (355,6 - 2 \cdot 6,4)^2) = 7.062,22 \text{ mm}^2$$

Para cálculos se considera  $St = 7.062 \text{ mm}^2$

#### RESISTENCIA LONGITUDINAL DEL METAL DE LA TUBERÍA

$$Rl = \frac{\rho}{St} 10^9 (\Omega / \text{Km})$$

Tramo 20 ":

$$Rl = \frac{1,7 \cdot 10^{-7}}{11.173} 10^9 = 0,015 \Omega / \text{Km}$$

Tramos 14 ":

$$Rl = \frac{1,7 \cdot 10^{-7}}{7.062} 10^9 = 0,024 \Omega / \text{Km}$$

#### CONDUCTANCIA LATERAL DEL REVESTIMIENTO

$$G_{lat} = \frac{S_{lateral}}{ru} 1 / \Omega \text{Km}$$

Con revestimiento nuevo:

$$G_{lat} (20") = \frac{1.600}{20.000} = 0,080 1 / \Omega \text{Km}$$

$$G_{lat} (20") = \frac{1.130}{20.000} = 0,057 1 / \Omega \text{Km}$$

Con revestimiento avejentado:

$$G_{lat} (20") = \frac{1.600}{5.000} = 0,320 1 / \Omega \text{Km}$$

$$G_{lat} (20") = \frac{1.130}{5.000} = 0,226 1 / \Omega \text{Km}$$

#### FACTORES DE ATENUACION DEL POTENCIAL

$$a = \sqrt{Rl \cdot G_{lat}} \quad (1/\text{km})$$

Con revestimiento nuevo:

$$a (20") = \sqrt{0,015 \cdot 0,080} = 0,035 1/\text{km}$$

$$a (14") = \sqrt{0,024 \cdot 0,057} = 0,037 1/\text{km}$$



Con revestimiento avejentado:

$$a (20 ") = \sqrt{0,015 \cdot 0,320} = 0,069 \text{ 1/km}$$

$$a (14 ") = \sqrt{0,024 \cdot 0,226} = 0,071 \text{ 1/km}$$

#### RESISTENCIA CARACTERISTICA DEL CONJUNTO TUBERÍA - REVESTIMIENTO

$$Rc = \sqrt{\frac{RI}{G \text{ lat}}} \quad (\Omega)$$

Con revestimiento nuevo:

$$Rc (20") = \sqrt{\frac{0,015}{0,080}} = 0,433 \quad \Omega$$

$$Rc (14") = \sqrt{\frac{0,024}{0,057}} = 0,649 \quad \Omega$$

Con revestimiento avejentado:

$$Rc (20") = \sqrt{\frac{0,015}{0,320}} = 0,217 \quad \Omega$$

$$Rc (14") = \sqrt{\frac{0,024}{0,226}} = 0,326 \quad \Omega$$

El diseño del sistema pretende realizar la protección del gasoducto instalando una EPC en el origen ( Estación de Compresión de Lumbier ) y otra en la futura Posición de Ezperun. La primera ha de ser capaz de dar protección a los 23.656 m del tramo Lumbier - Ezperun y la segunda a los dos tramos Ezperun – Beriain ( 8.507 m ) y Ezperun – Urroz ( 11.346 m ).

Una Estación de Protección Catódica ejerce su acción a ambos lados del punto de la conducción en el que conectamos el conductor por el que se inyecta la intensidad. La distancia máxima que puede proteger una EPC en un sentido es:

$$L \text{ máx} = \frac{\text{ArcCh } \frac{E_0}{EI}}{a}$$

Obtenida de la fórmula f1 del punto 1.8.1.4.2. ESTUDIO MATEMÁTICO DE LA ATENUACIÓN DEL POTENCIAL del ANEXO 1.8.1 :  $E_0 = EI \text{ Ch } a l$

Como se ha dicho anteriormente, el potencial más negativo que se puede aportar en el punto de inyección es de  $E_o = -2,45$  V y en el punto más extremo el potencial más alto para tener protección es  $E_i = -0,45$  V.

Según esto, para los factores de atenuación calculados las distancias máximas que puede proteger una EPC serán:

Tramo Lumbier - Ezperun  
con revestimiento nuevo:

$$L_{\text{máx}} = \frac{\text{ArcCh} \frac{-2,45}{-0,45}}{0,035} = 67,97 \text{ km}$$

con revestimiento envejecido:

$$L_{\text{máx}} = \frac{\text{ArcCh} \frac{-2,45}{-0,45}}{0,069} = 34,48 \text{ km}$$

Dado que este tramo tendrá una longitud de 23,66 km es correcto alimentarlo con una sola EPC ubicada en su Pk 0.

Tramos Ezperun – Beriain y Ezperun - Urroz  
con revestimiento nuevo:

$$L_{\text{máx}} = \frac{\text{ArcCh} \frac{-2,45}{-0,45}}{0,037} = 64,30 \text{ km}$$

con revestimiento envejecido:

$$L_{\text{máx}} = \frac{\text{ArcCh} \frac{-2,45}{-0,45}}{0,071} = 33,51 \text{ km}$$

Las longitudes de los tramos son 8,51 km y 11,35 km, por lo que pueden protegerse con una sola EPC.

### 2.3. POTENCIALES EN LOS PUNTOS DE INYECCIÓN

Hemos de conocer el incremento de potencial que ha de darse en el punto de inyección ( EPC ) para que el potencial en los extremos de la conducción sea tal que no se produzca corrosión.

Cálculo para la EPC nº 1 ( EC Lumbier ) :

Con revestimiento nuevo:

$$\Delta E_o = \Delta E_i \cdot \text{Ch} ( a \cdot L ) = -0,45 \cdot \text{Ch} ( 0,035 \cdot 23,54 ) = -0,61 \text{ V}$$

El potencial mínimo en el punto de inyección ha de ser:

$$E_o = -0,55 + \Delta E_o = -0,55 - 0,61 = -1,16 \text{ V}$$

Con revestimiento avejentado:

$$\Delta E_o = \Delta E_i \cdot Ch (a \cdot L) = -0,45 \cdot Ch (0,069 \cdot 23,54) = -1,19 \text{ V}$$

El potencial mínimo en el punto de inyección ha de ser:

$$E_o = -0,55 + \Delta E_o = -0,55 - 1,19 = -1,74 \text{ V}$$

Cálculo para la EPC nº 2 ( Posición de Ezperun) :

A las longitudes de los dos tramos que va a proteger la EPC nº 2 los vamos a llamar L1 y L2.

$$L1 = 8,51 \text{ km} \quad L2 = 11,35 \text{ km}$$

El incremento de potencial a obtener en el punto de inyección para conseguir la protección de los dos tramos viene dado por:

Con revestimiento nuevo:

$$\Delta E_o = \Delta E_i \cdot Ch (a \cdot L1) = -0,45 \cdot Ch (0,037 \cdot 8,51) = -0,47 \text{ V}$$

$$\Delta E_o = \Delta E_i \cdot Ch (a \cdot L2) = -0,45 \cdot Ch (0,037 \cdot 11,35) = -0,49 \text{ V}$$

Tomando como incremento de potencial mínimo de inyección de la EPC el de mayor valor absoluto, el potencial mínimo en el punto de inyección ha de ser:

$$E_o = -0,55 + \Delta E_o = -0,55 - 0,49 = -1,04 \text{ V}$$

Con revestimiento avejentado:

$$\Delta E_o = \Delta E_i \cdot Ch (a \cdot L1) = -0,45 \cdot Ch (0,071 \cdot 8,51) = -0,54 \text{ V}$$

$$\Delta E_o = \Delta E_i \cdot Ch (a \cdot L2) = -0,45 \cdot Ch (0,071 \cdot 11,35) = -0,61 \text{ V}$$

$$E_o = -0,55 + \Delta E_o = -0,55 - 0,61 = -1,16 \text{ V}$$

## 2.4. CORRIENTE DE INYECCIÓN NECESARIA

Las resistencias equivalentes de cada tramo serán:

$$R_{eq} = \frac{R_c}{Th (a L)}$$

Tramo Lumbier – Ezperun

Con revestimiento nuevo

$$R_{eq} = \frac{0,433}{Th ( 0,035 \cdot 23,656 )} = 0,64 \Omega$$

Con revestimiento envejecido

$$R_{eq} = \frac{0,217}{Th ( 0,069 \cdot 23,656 )} = 0,23 \Omega$$

Tramo Ezperun - Beriain

Con revestimiento nuevo

$$R_{eq} = \frac{0,649}{Th ( 0,037 \cdot 8,507 )} = 2,13 \Omega$$

Con revestimiento envejecido

$$R_{eq} = \frac{0,326}{Th ( 0,071 \cdot 8,507 )} = 0,60 \Omega$$

Tramo Ezperun -Urroz

Con revestimiento nuevo

$$R_{eq} = \frac{0,649}{Th ( 0,037 \cdot 11,346 )} = 1,64 \Omega$$

Con revestimiento envejecido

$$R_{eq} = \frac{0,326}{Th ( 0,071 \cdot 11,346 )} = 0,49 \Omega$$

Las intensidades de protección para cada tramo serán:

$$I = \frac{\Delta E_o}{R_{eq}}$$

Tramo Lumbier – Ezperun

Con revestimiento nuevo

$$I = \frac{0,61}{0,64} = 0,95 \text{ A}$$

Con revestimiento envejecido

$$I = \frac{1,19}{0,23} = 5,17 \text{ A}$$

Tramo Ezperun - Beriain

Con revestimiento nuevo

$$I = \frac{0,49}{2,09} = 0,23 \text{ A}$$

Con revestimiento envejecido

$$I = \frac{0,61}{0,59} = 1,03 \text{ A}$$

Tramo Ezperun -Urroz

Con revestimiento nuevo

$$I = \frac{0,49}{1,64} = 0,3 \text{ A}$$

Con revestimiento envejecido

$$I = \frac{0,61}{0,49} = 1,24 \text{ A}$$

La corriente total suministrada por las Estaciones de Protección Catódica ha de ser:

EPC 1 al inicio de la vida de la instalación: 0,95 A

EPC 1 al cabo de unos años: 5,17 A

EPC 2 al inicio de la vida de la instalación:  $0,23 + 0,30 = 0,53 \text{ A}$

EPC 2 al cabo de unos años:  $1,03 + 1,24 = 2,27 \text{ A}$

## 2.5. LECHOS ANÓDICOS

A la hora de establecer la ubicación de un lecho de ánodos la consideración más importante es la resistividad del terreno en el que se va a enterrar.

Otras consideraciones que deben ser tenidas en cuenta son:

- La existencia de otras estructuras metálicas enterradas en el área de influencia del lecho anódico. Si las hay, esto es un problema dado que pueden aparecer corrientes vagabundas que interfieran con las del propio lecho anódico. Esta situación requeriría adoptar medidas correctivas. Se debe buscar otra ubicación antes de instalar el lecho en esas condiciones.

- El sitio elegido ha de estar dentro de la servidumbre de paso del gasoducto, en terreno expropiado o cedido para su uso concreto.

- Se ha de tener presente la necesidad de alimentación eléctrica para la Estación de Protección Catódica.
- El lugar ha de estar razonablemente accesible tanto para la construcción del lecho como para su mantenimiento.
- Asegurarse de que no existen planes de construcción de otras infraestructuras en el entorno en un futuro cercano.

La localización de lugares idóneos para la instalación de ánodos es más sencilla para el caso de ánodos galvánicos que para lechos anódicos para sistemas de corriente impresa debido a que los primeros se van instalando en la servidumbre de paso del gasoducto y no requieren fuente de alimentación eléctrica.

Una vez determinada la corriente eléctrica que se necesitará inyectar para tener protegida la totalidad de la tubería se diseña el lecho anódico, que será el material que se sacrificará para dotar al gasoducto de protección contra la corrosión.

Se proyectan los lechos de las dos EPC para una duración de 20 años.

Analizados los tipos de ánodos para lechos de corriente impresa que actualmente se ofertan en el mercado se ha optado por la instalación de ánodos de Titanio-Oxidos de Titanio ( Ti-MMO ) debido a las notables ventajas que ofrece frente a los tradicionales ánodos de grafito o de ferrosilicio, como son su mucha mayor ligereza, elevada salida de corriente y resistencia mucho más baja.

Teniendo en cuenta las intensidades requeridas para la protección de los distintos tramos de gasoducto, 5,17 A para el tramo Lumbier - Ezperun y 2,27 A para el conjunto de los dos tramos Ezperun - Beriain y Ezperun - Urroz, se calculan los lechos anódicos

#### LECHO ANODICO DE LA EPC1

Se instalarán 3 ánodos de Ti-MMO tipo WSt.1 que cumplen con las exigencias calculadas. A su rendimiento máximo, entre los 3 ánodos podrían suministrar 12 A, con lo que se tendrá un margen de seguridad por si falla la inyección de corriente por alguno de ellos.

Las medidas de cada ánodo son las siguientes: 20 · 3 · 1000 mm

Se enterrarán en posición vertical y rodeados de backfill, formando cada uno de ellos un cilindro de 30 cm de diámetro total. La parte superior de cada ánodo con backfill quedará enterrada a una profundidad mínima de 1 m.

#### Backfill

El backfill que rodea al ánodo cumple dos funciones:

- conseguir una resistividad muy baja. Tiene el efecto de incrementar el tamaño del ánodo, dando como resultado la reducción de la resistencia a tierra.
- la corriente se transmite desde el ánodo al backfill por contacto directo, y la mayor parte del material consumido pertenece a la parte exterior del cilindro de backfill.

El suministrador de los ánodos recomienda como backfill el empleo de coque de petróleo calcinado a alta temperatura, debido a su alta conductividad y rendimiento uniforme, e indica las densidades máximas de corriente de salida según el grado de humedad del suelo:

Densidad de corriente para el backfill de coque calcinado	
Medio	Densidad en A/ m <sup>2</sup>
Suelo muy seco	1,08
Suelo seco	1,61
Suelo parcialmente seco por encima del nivel freático	2,15
Suelo mojado, por debajo del nivel freático	3,22

En nuestro caso hemos de considerar una densidad  $J = 2,15 \text{ A/ m}^2$

La longitud mínima activa que ha de tener cada ánodo dispersor será

$$L = \frac{I}{\pi \cdot d \cdot J_{\text{backfill}}}$$

Siendo  $L$  la longitud del conjunto ánodo-backfill

$I$  la corriente máxima del dispersor

$d$  el diámetro del conjunto ánodo-backfill

$J_{\text{backfill}}$  la densidad de corriente de salida del backfill

$$L = \frac{4}{\pi \cdot 0,3 \cdot 2,15} = 1,97 \text{ m}$$

Habrà una separación mínima entre los ánodos de 5 m para evitar que se interfieran.

La resistencia de un lecho anódico depende de los siguientes factores: resistividad del terreno en el que va a estar enterrado, dimensiones y geometría de los ánodos que formarán el lecho y del backfill del que va a estar rodeado.

Se han medido las resistividades de los terrenos en los que se van a ubicar los lechos de ambas EPC a tres profundidades ( 1, 2 y 3 m ). En la futura ubicación del lecho anódico de la EPC 1 la  $\rho$  más desfavorable de esas tres medidas ha sido 3500  $\Omega\text{cm}$ , que es la que se considera para los cálculos.

Se calcula la resistencia anódica mediante la fórmula de Sunde para lechos compuestos por varios ánodos en disposición vertical ( fórmula 3 del punto 1.8.1.4.1 )

$$R_N = \frac{\rho}{2\pi N L} \left[ \ln \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} \ln ( 0,656 N ) \right]$$

Donde

$R_N$  = resistencia a tierra del lecho, en  $\Omega$

$\rho$  = resistividad del terreno en el lugar en el que irá enterrado el lecho anódico.

$L$  = longitud del conjunto ánodo-backfill, en m

$d$  = diámetro del conjunto ánodo-backfill

$h$  = profundidad desde la superficie del terreno al centro del ánodo

$$R_N = \frac{3500}{2 \pi 3 \cdot 197} \left[ \ln \frac{8 \cdot 197}{30} - 1 + \frac{2 \cdot 197}{500} \ln ( 0,656 \cdot 3 ) \right] = 3,29 \Omega$$

Resistencia de los conductores. Existen tres resistencias de cables a considerar:

R(-) = resistencia del cable de conexión del polo (-) del rectificador a la tubería

R(+) = resistencia del cable de conexión del polo (+) del rectificador al lecho anódico

Ra = resistencia del cable de conexión entre ánodos

La resistencia total de los cables es la suma de esas 3 resistencias en serie

$$R_t = R(-) + R(+) + R_a$$

Para el cálculo de las resistencias de esos cables emplearemos la fórmula

$$R = \rho_{Cu} \frac{L}{S}$$

En la que  $\rho_{Cu}$  es la resistividad del cobre =  $0,0178 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$

L es la longitud del cable, en m

S es la sección del cable, en  $\text{mm}^2$

La Norma UNE-EN 12954 “ Protección catódica de estructuras metálicas enterradas o sumergidas. Principios generales y aplicación para tuberías “ en su punto 7.11.3 Cables indica:

“ La sección transversal de los cables se determina basándose en los siguientes criterios:

- caídas de tensión técnicamente admisibles
- resistencia mecánica
- economía

La sección transversal total de algunos cables utilizados no debe ser inferior a la que se especifica a continuación:

a) Sistemas de corriente impresa

- Cable para estructura protegida:  $10 \text{ mm}^2\text{Cu}$
- Cable para lecho de ánodos:  $4 \times 2,5 \text{ mm}^2\text{Cu}$  o  $10 \text{ mm}^2\text{Cu}$

b) Sistemas de ánodos galvánicos

- Cable para estructura protegida:  $4 \text{ mm}^2\text{Cu}$
- Cable ánodo individual:  $2,5 \text{ mm}^2\text{Cu}$

c) Otras instalaciones

- Cable para medición de potencial:  $2 \times 2,5 \text{ mm}^2\text{Cu}$  o  $6 \text{ mm}^2\text{Cu}$
- Cable para mediciones de intervalos de corriente:  $4 \times 2,5 \text{ mm}^2\text{Cu}$
- Cable para asegurar la unión de continuidad:  $4 \times 2,5 \text{ mm}^2\text{Cu}$  o  $10 \text{ mm}^2\text{Cu}$

Se requieren conexiones separadas de la estructura para cada alma o cable con una función separada. “

Por otra parte, la empresa concesionaria del gasoducto indica en su Especificación



E-6 que la sección mínima de los cables que conexionan la Estación de Protección Catódica con la tubería y con el lecho anódico ha de ser de 25 mm<sup>2</sup>

Teniendo en cuenta lo anterior, se calcula la resistencia de los cables que parten de la EPC hasta la tubería [ R(-) ] y de la EPC hasta el lecho anódico [ R(+) ] considerando que dichos cables tendrán una sección de 25 mm<sup>2</sup>.

Longitud del cable anódico: 127 m

$$\text{Resistencia del cable anódico: } R(-) = 0,0178 \frac{127}{25} = 0,09 \Omega$$

Longitud del cable catódico: 138,5 m

$$\text{Resistencia del cable catódico: } R(+) = 0,0178 \frac{138,5}{25} = 0,10 \Omega$$

Como resistencia efectiva del cable de interconexión entre los ánodos se toma la correspondiente a la mitad de su longitud:

$$R_a = 0,0178 \cdot \frac{5}{25} = 0,004 \Omega$$

La resistencia tubo-tierra se considera despreciable.

La resistencia total del circuito será

$$R_{\text{TOTAL}} = R_{\text{lecho}} + R(-) + R(+) + R_a = 3,29 + 0,09 + 0,10 + 0,004 = 3,48 \Omega$$

Una vez conocidas la R total del circuito y la corriente aplicamos la ley de Ohm para calcular el voltaje que ha de suministrar la EPC

$$V = I_{\text{req}} \cdot R_{\text{TOTAL}} = 5,17 \cdot 3,48 = 17,99 \text{ V}$$

La EPC estándar del mercado que más se acerca a nuestros requerimientos tiene los siguientes parámetros eléctricos de salida: 30 V / 10 A

Calculo de la caída de tensión del cable anódico de unión de la EPC1 al lecho anódico:

$$V = I \cdot R = I \cdot \rho_{\text{Cu}} \frac{L}{S} = 5,17 \cdot 0,0178 \frac{127}{25} = 0,47 \text{ V}$$

que supone una caída de tensión del 1,57 %

Calculo de la caída de tensión del cable catódico de unión de la EPC a la tubería:

$$V = I \cdot R = I \cdot \rho_{\text{Cu}} \frac{L}{S} = 5,17 \cdot 0,0178 \frac{138,5}{25} = 0,51 \text{ V}$$

que supone una caída de tensión del 1,7 %

El limite máximo admitido para la caída de tensión es de un 10 %

## LECHO ANODICO DE LA EPC2

Según el mismo criterio aplicado a la EPC1 se instalarán 2 ánodos de Ti-MMO tipo WSt.1, con las siguientes medidas del ánodo:

$$20 \cdot 3 \cdot 1000 \text{ mm}$$

Se enterrará a una profundidad de 1,5 m en posición vertical y rodeado de backfill, formando un cilindro de 30 cm de diámetro.

En la ubicación del lecho de la EPC 2 se toma como  $\rho$  más desfavorable la tomada a 2 m de profundidad, que ha sido de 3380  $\Omega\text{cm}$ .

A su rendimiento máximo, los ánodos podría suministrar 8 A.

La longitud mínima activa que ha de tener cada ánodo es la ya calculada para el lecho de la EPC1, 197 cm

La resistencia eléctrica del lecho será, según la fórmula de Sunde ya empleada en el lecho de la EPC1:

$$R_N = \frac{\rho}{2\pi N L} \left[ \ln \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} \ln (0,656 N) \right]$$

Donde  $R_N$  = resistencia a tierra del lecho, en  $\Omega$   
 $\rho$  = resistividad del terreno en el lugar en el que irá enterrado el lecho anódico.  
 $L$  = longitud del conjunto ánodo-backfill, en m  
 $d$  = diámetro del conjunto ánodo-backfill  
 $h$  = profundidad desde la superficie del terreno al centro del ánodo

$$R_N = \frac{3380}{2 \pi 2 \cdot 197} \left[ \ln \frac{8 \cdot 197}{30} - 1 + \frac{2 \cdot 197}{500} \ln (0,656 \cdot 2) \right] = 4,31 \Omega$$

Longitud del cable anódico: 137,9 m

Resistencia del cable anódico:  $R(-) = 0,0178 \cdot \frac{137,9}{25} = 0,10 \Omega$

Longitud del cable catódico del Ramal a Beriain: 20,6 m

Resistencia del cable catódico del Ramal a Beriain:  $R(+) = 0,0178 \cdot \frac{20,6}{25} = 0,01 \Omega$

Longitud del cable catódico del Ramal a Urroz: 67,3 m

Resistencia del cable catódico del Ramal a Urroz:  $R(+) = 0,0178 \cdot \frac{67,3}{25} = 0,05 \Omega$

La resistencia tubo-tierra se considera despreciable.

Dado que con la EPC2 se va a suministrar corriente a los dos Tramos de gasoducto que establecerán un circuito eléctrico paralelo, la resistencia total del circuito será la del lecho y la del cable anódico en serie con las de los cables catódicos de los gasoductos en paralelo

$$R_{TOTAL} = R_{lecho} + R(-) + \frac{R1 R2}{R1+R2} = 4,31 + 0,1 + \frac{0,01 \cdot 0,05}{0,01+0,05} = 4,42 \Omega$$

El voltaje a suministrar por la EPC2 será

$$V = I_{req} \cdot R_{TOTAL} = 2,27 \cdot 4,42 = 10,03 V$$

La EPC2 será igual a la 1 : 30 V / 10 A

Cálculo de la caída de tensión del cable catódico de unión de la EPC a la tubería del Tramo Ezperun – Urroz:

$$V = I \cdot R = I \cdot \rho_{Cu} \frac{L}{S} = 1,24 \cdot 0,0178 \frac{67,3}{25} = 0,06 V$$

que supone una caída de tensión del 0,2 %

Cálculo de la caída de tensión del cable catódico de unión de la EPC a la tubería del Tramo Ezperun – Beriain:

$$V = I \cdot R = I \cdot \rho_{Cu} \frac{L}{S} = 1,03 \cdot 0,0178 \frac{20,6}{25} = 0,02 V$$

que supone una caída de tensión del 0,07 %

Calculo de la caída de tensión del cable catódico de unión de la EPC a la tubería:

$$V = I \cdot R = I \cdot \rho_{Cu} \frac{L}{S} = 2,27 \cdot 0,0178 \frac{137,9}{25} = 0,22 V$$

que supone una caída de tensión del 0,73 %

El límite máximo admitido para la caída de tensión es de un 10 %

## 2.6. INFLUENCIAS CONDUCTIVAS POR LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN

No se tienen en cuenta las líneas eléctricas de tensión inferior a 15 KV , ni las que se encuentren a distancia superior a la especificada en la siguiente tabla:

Tensión nominal U ( kV )	Resistividad del terreno $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Resistencia de Tierra del apoyo $R_p$ ( $\Omega$ )	Distancias X ( m )		Factor de Reducción
			Sin cable de guarda	Con cable de guarda	
380	1000	30	200	50	0,25
	300	10	170	35	0,20
	100	3	120	25	0,20
220	300	15	110	20	0,18
	60	3	90	18	0,20
132	$\leq 600$	$\geq 20$	70	40	
66	300	25	30	15	0,5
45	$\leq 600$	$\geq 20$	25	-	
15 ÷ 20	$\leq 600$	$\geq 20$	15	-	

El cálculo de la diferencia de potencial que puede aparecer entre la superficie de la tubería y el apoyo eléctrico en caso de descarga a tierra lo realizamos aplicando la *fórmula 4 del apartado 1.8.2.3.2.*

$$V_x = \frac{V_p k_1 k_2}{R_p} \frac{\rho}{2\pi X}$$

Donde  $V_x$  es el potencial a una distancia X

$V_p$  es el voltaje de la línea

$R_p$  es la resistencia a tierra del apoyo eléctrico

$K_1$ : coeficiente a aplicar teniendo en cuenta si la línea posee cable de guarda.

Si no hay cable de guarda,  $K_1 = 1$

$K_2$ : coeficiente de alimentación simple o doble de la línea eléctrica

Simple alimentación :  $K_2 = 1$

Doble alimentación :  $K_2 = 1,3$

CRUCE AT1

U= 66 Kv.

Sin cable de guarda.

Doble circuito

$R_p = 18 \Omega$

$\rho = 42 \Omega\text{m}$

X = 122 m

$$V_x = \frac{66 \cdot 1,3 \cdot 42}{\sqrt{3} \cdot 18 \cdot 2 \pi 122} = 0,15 \text{ kV}$$

CRUCE AT2

U= 30 Kv  
Sin cable de guarda.  
1circuito  
 $R_p = 7,8 \, \Omega$   
 $\rho = 39,8 \, \Omega m$   
X = 62 m

$$V_x = \frac{30 \cdot 39,8}{\sqrt{3} \cdot 7,8 \cdot 2 \pi 62} = 0,23 \, kV$$

CRUCE AT3

U= 66 Kv  
Sin cable de guarda.  
1circuito  
 $R_p = 5,9 \, \Omega$   
 $\rho = 62 \, \Omega m$   
X = 68 m

$$V_x = \frac{66 \cdot 62}{\sqrt{3} \cdot 5,9 \cdot 2 \pi 68} = 0,94 \, kV$$

CRUCE AT4

U= 30 Kv  
Sin cable de guarda.  
1circuito  
 $R_p = 6,8 \, \Omega$   
 $\rho = 58,3 \, \Omega m$   
X = 28 m

$$V_x = \frac{30 \cdot 58,3}{\sqrt{3} \cdot 6,8 \cdot 2 \pi 28} = 0,85 \, kV$$

CRUCE AT5

U= 30 Kv  
Sin cable de guarda.  
1circuito  
 $R_p = 5,6 \, \Omega$   
 $\rho = 56,54 \, \Omega m$   
X = 35 m

$$V_x = \frac{30 \cdot 56,54}{\sqrt{3} \cdot 5,6 \cdot 2 \pi 35} = 0,80 \, kV$$

CRUCE AT6

U= 30 Kv

Sin cable de guarda.

1 circuito

Rp = 3,9 Ω

ρ = 51,15 Ωm

X = 35 m

$$V_x = \frac{30 \cdot 51,15}{\sqrt{3} \cdot 3,9 \cdot 2 \pi 35} = 1,03 \text{ kV}$$

CRUCE AT7

U= 220 Kv

Sin cable de guarda.

Doble circuito

Rp = 2,7 Ω

ρ = 15,65 Ωm

X = 64 m

$$V_x = \frac{220 \cdot 13,65}{\sqrt{3} \cdot 2,7 \cdot 2 \pi 64} = 2,08 \text{ kV}$$

CONCLUSIÓN: aunque se produzca un cortocircuito, el revestimiento del gasoducto no va a estar sometido a los 5 kV de riesgo.

Pamplona, 31 de agosto del 2.014

Carlos Ramírez Ballabriga

### **DOCUMENTO 3. PLANOS**

**Pamplona, 31 de agosto del 2.014**

**Carlos Ramírez Ballabriga**

## INDICE DEL DOCUMENTO 3. PLANOS

- 3.1. LISTADO DE PLANOS
- 3.2. PLANOS DEL TRAZADO DEL GASODUCTO CON UBICACIÓN DE EQUIPOS
- 3.3. PLANOS DE DETALLE



## LISTADO DE PLANOS

Nº DE PLANO	DESCRIPCIÓN
G-01	PLANO GENERAL
L-01	PLANO LINEAL TRAMO LUMBIER – EZPERUN. PK 0 A 0,445
L-02	PLANO LINEAL TRAMO LUMBIER – EZPERUN. PK 0,445 A 2,652
L-03	PLANO LINEAL TRAMO LUMBIER – EZPERUN. PK 2,652 A 4,236
L-04	PLANO LINEAL TRAMO LUMBIER – EZPERUN. PK 4,236 A 6,522
L-05	PLANO LINEAL TRAMO LUMBIER – EZPERUN. PK 6,522 A 10,675
L-06	PLANO LINEAL TRAMO LUMBIER – EZPERUN. PK 10,675 A 11,173
L-07	PLANO LINEAL TRAMO LUMBIER – EZPERUN. PK 11,173 A 14,880
L-08	PLANO LINEAL TRAMO LUMBIER – EZPERUN. PK 14,880 A 15,528
L-09	PLANO LINEAL TRAMO LUMBIER – EZPERUN. PK 15,528 A 19,344
L-10	PLANO LINEAL TRAMO LUMBIER – EZPERUN. PK 19,344 A 19,407
L-11	PLANO LINEAL TRAMO LUMBIER – EZPERUN. PK 19,407 A 23,121

L-12	<p>PLANO LINEAL</p> <p>TRAMO LUMBIER – EZPERUN.PK 23,121 A Posición de Ezperun</p> <p>TRAMO EZPERUN - BERIAIN. PK 0 A 3,423</p> <p>TRAMO EZPERUN - URROZ. PK 0 A 0,302</p>
L-13	<p>PLANO LINEAL TRAMO EZPERUN - BERIAIN.</p> <p>PK 3,423 A 7,399</p>
L-14	<p>PLANO LINEAL TRAMO EZPERUN - BERIAIN.</p> <p>PK 7,399 A 7,467</p>
L-15	<p>PLANO LINEAL TRAMO EZPERUN - BERIAIN.</p> <p>PK 7,467 A Posición de Beriaín</p>
L-16	<p>PLANO LINEAL TRAMO EZPERUN - URROZ.</p> <p>PK 1,243 A 4,189</p>
L-17	<p>PLANO LINEAL TRAMO EZPERUN - BERIAIN.</p> <p>PK 4,189 A 7,157</p>
L-18	<p>PLANO LINEAL TRAMO EZPERUN - BERIAIN.</p> <p>PK 7,157 A 8,871</p>
L-19	<p>PLANO LINEAL TRAMO EZPERUN - BERIAIN.</p> <p>PK 8,871 A 10,047</p>
L-20	<p>PLANO LINEAL TRAMO EZPERUN - BERIAIN.</p> <p>PK 10,047 A Posición de Urroz</p>
EM-01	EMPLAZAMIENTO EPC1, LECHO ANÓDICO Y ELECTRODO DE REFERENCIA
EM-02	EMPLAZAMIENTO EPC2, LECHO ANÓDICO Y ELECTRODO DE REFERENCIA
EL-01	ELECTRICO LINEA GASODUCTO
EL-02	ELECTRICO CONEXIONES A EPC1
EL-03	ELECTRICO GENERAL POSICIÓN EZPERUN
EL-04	ELECTRICO CONEXIONES A EPC2
EL-05	ELECTRICO PROT. CATÓDICA LOCAL POSICIÓN EZPERUN
D-01	DETALLE LECHO ANÓDICO 1
D-02	DETALLE LECHO ANÓDICO 2
D-03	DETALLE MONTAJE EPC1 Y CUADRO CIPC
D-04	DETALLE MONTAJE EPC2 Y CUADRO CIPC
D-05	DETALLE CONEXIÓN TOMA DE POTENCIAL SIMPLE

D-06	DETALLE CONEXIÓN TOMA DE POTENCIAL SIMPLE CON ELECTRODO DE REFERENCIA Y PROBETA
D-07	DETALLE CONEXIÓN TOMA DE POTENCIAL ESPECIAL CON ELECTRODO DE REFERENCIA
D-08	DETALLE CONEXIÓN TOMA DE POTENCIAL ESPECIAL CON ELECTRODO DE REFERENCIA Y PROBETA
D-09	DETALLE DE CONEXIÓN DE DESCARGADORES Y RESISTENCIA EN TOMA DE POTENCIAL ESPECIAL
D-10	DETALLE DE SOLDADURA DE CABLE A TUBERIA
D-11	DETALLE ZANJAS PASO CABLES
C-01	CRUCE CON EL CANAL DE NAVARRA
C-02	CRUCE CON EL FERROCARRIL CASTEJÓN - ALSASUA

EL DOCUMENTO 3. PLANOS SE ANEXA EN OTRO TOMO ( 2 / 2 )

Pamplona, 31 de agosto del 2.014

Carlos Ramírez Ballabriga

## **DOCUMENTO 4 . PLIEGO DE CONDICIONES**

## INDICE DEL DOCUMENTO 4 . PLIEGO DE CONDICIONES

4.1. ESTACIONES DE PROTECCIÓN CATÓDICA .....	114
4.2. ANODOS DISPERSORES DE CORRIENTE .....	119
4.3. TOMAS DE POTENCIAL .....	121
4.4. ELECTRODO DE REFERENCIA .....	124
4.5. TIERRAS ELÉCTRICAS Y PROTECCIÓN CATÓDICA EN LA POSICIÓN DE EZPERUN .....	125
4.6. CABLES Y CONEXIONES .....	127
4.7. CUADRO DE INYECCIÓN DE CORRIENTE (CIPC) .....	128
4.8. VERIFICACIÓN DEL ESTADO DE LAS PROBETAS .....	129
4.9. PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA .....	131
4.10. CONTROL Y MANTENIMIENTO .....	134

---

#### 4.1. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE ESTACIONES DE PROTECCION CATODICA

---

##### ARMARIO

El armario será para exterior, de poliéster reforzado con fibra de vidrio. Dispondrá de puerta con cerradura e irá preparado para su montaje sobre basamento. Estará dotado de ventilación para su refrigeración y para evitar condensaciones. Habrá suficiente espacio libre en su interior para alojar varios equipos registradores. En la documentación del equipo debe indicarse el material de fabricación y el grado de protección.

Las entradas y salidas de conductores se realizarán por la parte inferior del armario, a través de tubo conduit, para lo que se dispondrá de una lámina desmontable con prensaestopas y juntas.

##### RECTIFICADOR

Constará de los siguientes componentes:

- Transformador para adaptar la tensión de la red a tensiones de utilización y establecer una separación galvánica. Sus devanados serán totalmente independientes, con un aislamiento de al menos 3 kV. El voltaje de salida del bobinado secundario no debe ser mayor de 50 V.
- Circuito rectificador de onda completa mediante tiristores, con protecciones RC, para alimentar en corriente continua tanto al circuito exterior de protección como al de control de la propia Estación de Protección Catódica. La salida estará protegida mediante fusible, limitación de corriente y descargadores de sobretensiones. El factor de rizado será como máximo de un 4,5 % eficaz.
- Filtros antiparasitarios.
- Bloque de regulación y control de la tensión e intensidad de inyección.
- Elementos de protección, tanto del equipo como de las personas.
- Bloque de señalización, indicadores y alarmas.
- Dispositivos de telecontrol y telemando.

Será alimentado con una tensión de 230 Vca – 50 Hz. Estará protegido a la entrada de dicha alimentación eléctrica mediante descargadores de sobretensiones.

La salida será de corriente continua, de 30 V / 10 A.

##### MODOS DE FUNCIONAMIENTO

Tendrá la posibilidad de funcionar en modo manual o automático.

##### Funcionamiento en modo MANUAL

En este modo se podrá dar una tensión de salida fija, de 0 Vcc a la máxima tensión. Dicha tensión de salida se establecerá mediante un potenciómetro

## Funcionamiento en modo AUTOMÁTICO

Incorporará tres lazos de control: regulación de tensión, de intensidad y de intensidad mínima.

### a) Regulación de tensión

Mediante un potenciómetro se establecerá el potencial que se desea mantener en el punto de inyección, independientemente de las variaciones de la tensión de entrada o de la carga en la salida.

El equipo incorporará un lazo de control que comparará el potencial de la tubería respecto al electrodo de referencia impolarizable de cobre/sulfato de cobre y un potencial de protección de consigna establecido previamente. La diferencia de potencial resultante se utiliza para regular la salida de corriente del transforrectificador variando el ángulo de conducción de los tiristores del puente rectificador. El lazo de medida ha de tener una impedancia de entrada elevada, de al menos  $1\text{ M}\Omega$ .

El funcionamiento automático se hace mucho más adecuado cuando las condiciones del circuito exterior sean muy variables.

### b) Lazo de limitación de intensidad

Igual que para el potencial de salida, se fijará un valor de consigna para la intensidad de salida, se medirá el valor de la corriente inyectada mediante un shunt y se corregirá la diferencia con el fin de no superar el valor máximo de corriente de salida.

### c) Lazo de regulación de intensidad mínima

Se tendrá la posibilidad de establecer como consigna un determinado valor de intensidad mínima a inyectar, con objeto de que la tubería no quede desprotegida en ningún momento, ni en los puntos más alejados del lugar de inyección de corriente.

Para poder pasar de un modo de funcionamiento al otro ( manual/automático ) se instalará un conmutador

El equipo incorporará un temporizador on/off con tiempo regulable de desconexión de la EPC. Esto permite medir los potenciales de la tubería con y sin inyección de corriente y permite comprobar el potencial de protección catódica de polarización. El temporizador será apropiado para realizar interrupciones de entre 1 y 3 segundos, y tiempos de conexión de entre 60 y 120 segundos.

En previsión de que el sistema pueda llegar a funcionar recibiendo la consigna desde un puesto remoto, se tendrá la opción de trabajar en modo "LOCAL" o en modo "REMOTO". En el modo "LOCAL" el potencial de consigna se establece mediante un selector o un potenciómetro desde el propio armario. En el modo "REMOTO" la consigna de potencial se recibe desde un Centro de Telecontrol exterior . El Terminal Remoto convertirá dicha consigna en una señal analógica de  $4 \div 20\text{ mA}$  o digital que será la que se envíe al rectificador.

## UNIDAD DE ALIMENTACIÓN

Tendrá los siguientes elementos:

- Un interruptor magnetotérmico bipolar de entrada
- Un interruptor diferencial bipolar de 30 mA de sensibilidad.
- Lámpara indicadora de funcionamiento.

- Toma de corriente para servicios auxiliares, a 230 Vca con protección mediante interruptor magnetotérmico.

## UNIDAD DE MEDIDA

Estará constituida por un indicador multimedida o tres indicadores individuales, con display LCD, con tamaño de dígito de 12 mm y que puedan ser desconectados mediante interruptor. Se tomarán las siguientes lecturas:

- Intensidad de salida en c.c.
- Tensión de salida en c.c.
- Potencial entre la tubería y el electrodo de referencia.

Las escalas de los instrumentos serán:

- Intensidad de salida, 0 ... 9,99 A
- Tensión de salida en c.c. 0 ... 99,99 Vcc
- Potencial entre la tubería y el electrodo de referencia. -9,99 ... 9,99 V

La impedancia interna será elevada,  $\geq 10 \text{ M}\Omega$  y la entrada de la señal del potencial de la tubería deberá ser inmune a una corriente alterna de 30 Vca ( 50 – 100 Hz ).

En el panel frontal se dispondrá de bornes (de color normalizado) para poder comprobar las tres lecturas mediante polímetro portátil.

## SEÑALIZACIÓN

Incorporará pilotos o diodos led para indicar presencia de tensión de red y alarmas.

## PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO Y SOBRETENSIONES EXTERNAS

Protección en la entrada de la alimentación eléctrica.-

Se instalará a la entrada de la alimentación del equipo ( fase y neutro ) un equipo de protección contra descargas atmosféricas y sobretensiones, consistente en un descargador montado entre fase y neutro y otro montado entre neutro y tierra. Estos descargadores irán montados sobre carril.

Los modelos de referencia son:

Para montaje entre fase y neutro,

Marca	PHOENIX CONTACT	DEHN
Modelo	VAL-MS-230,	DEHNguard T
Tensión de descarga AC	275 V	275 V
Corriente transitoria nominal (8/20)us	20 kA	20 kA
Nivel de protección	< 1,35 kV	1,5 kV
Tiempo de reacción	25 ns	< 25 ns

Para montaje entre neutro y tierra,

Marca	PHOENIX CONTACT	DEHN
Modelo	F-MS 12	DEHNgap C/T DGP CT 255
Tensión de descarga AC	260 V	275 V
Corriente transitoria nominal (8/20)us	20 kA	20 kA
Nivel de protección	1,00 kV	1,5 kV



Tiempo de reacción	100 ns	100 ns
--------------------	--------	--------

Protección en la salida de corriente continua del rectificador.-  
Se instalarán dos protecciones:

A la salida de corriente continua un equipo de protección contra descargas atmosféricas y sobretensiones, consistente en tres descargadores montados entre positivo/negativo, positivo/tierra y negativo/tierra.

Los modelos de referencia son:

Marca	PHOENIX CONTACT	DEHN
Modelo	VAL-MS-60	DEHNguard T DG T 75
Tensión de descarga DC	100 V	100 V
Corriente transitoria nominal (8/20)us	15 kA	15 kA
Nivel de protección	< 500 V	450 V
Tiempo de reacción	< 25 ns	< 25 ns

A la entrada de la señal de potencial entre el electrodo de referencia y el cable de la tubería, un descargador de sobretensiones con montaje en serie.

El modelos de referencia es:

Marca	DEHN
Modelo	VT KKS ADP 36
Tensión de descarga AC/DC	36,8 V
Corriente nominal	50 mA
Corriente transitoria nominal (8/20)us	40 kA
Nivel de protección	65 V
Tiempo de reacción	1 ns

## BORNERO

Se dispondrá de un bornero en el que se conectarán los conductores de entrada y salida. Tanto los conductores como los bornes en el interior del armario estarán marcados y numerados para la identificación de los circuitos.

## ALARMAS

Se dispondrá de un control de la tensión del potencial de la tubería que proporcione contactos libres de tensión que faciliten una alarma cuando este potencial sea más positivo de  $-0,90 \text{ Vcc}$ .

## TELECONTROL Y TELEMANDO

En previsión de que las señales se envíen a un Centro de Control remoto se hace necesario disponer de una interface de comunicación entre la EPC y la estación remota que mande dichas señales a distancia (  $4 \div 20 \text{ mA}$  a Telecontrol ). De esta forma, desde el citado Centro de Control se puede variar la consigna de potencial deseado.

Aunque el funcionamiento sea manual también puede interesar un sistema de telemedida que informe del estado de los distintos parámetros.

Las señales susceptibles de ser enviadas y recibidas por el equipo son:

- Señales de salida
  - Analógicas
    - Voltaje de salida
    - Intensidad de salida
    - Potencial tubería – suelo
  - Digitales
    - Modo de funcionamiento (automático-manual).
    - Alarmas
    - Modo de control (local-remoto)
- Señales de entrada
  - Analógicas
    - Consigna de potencial o intensidad
  - Digitales
    - selección del control local-remoto
    - selección de funcionamiento automático-manual

## PRUEBAS Y ENSAYOS

Los transforrectificadores deben ser sometidos a una serie de pruebas y ensayos en fábrica antes de su instalación y puesta en servicio, tales como:

- Pruebas de funcionamiento en vacío y carga. Se comprobará el correcto funcionamiento de la regulación, ajuste de límites, selección de funcionamiento, rizado, etc.
- Pruebas de sobrecarga, y cortocircuito en rectificadores automáticos, con comprobación de la limitación de corriente de salida.
- Pruebas de calentamiento a plena carga, verificando el ascenso de temperatura hasta el equilibrio.
  - Ensayo de aislamiento eléctrico, antes y después del ensayo de rigidez
  - Prueba de rigidez.

---

## 4.2. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE LOS ÁNODOS DISPERSORES DE CORRIENTE

---

### COMPOSICIÓN DE LOS ÁNODOS

Los ánodos estarán compuestos por un núcleo de Titanio con revestimiento catalítico a base de mezcla de óxidos, que cubrirán totalmente su superficie.

El Titanio utilizado como base para la fabricación de los ánodos tubulares estará de acuerdo con la Norma ASTM B 348 – grado 1, “Standard Specification Titanium and Titanium Alloy Bars billets”.

El revestimiento electrocatalítico formado por descomposición térmica de sales de metales del Grupo VIII se aplicará por rociado de las sales sobre el sustrato, y tendrá las siguientes propiedades fisicoquímicas:

- Estructura cristalina con una densidad comprendida entre 6 y 12 g/cm<sup>3</sup>
- Conductividad tipo metálica, con resistividad del orden de 0,00001 Ωcm
- Gran superficie de catalización de la reacción de oxidación, con una superficie específica comprendida entre 20 y 5 m<sup>2</sup>/g.

### DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS

Las dimensiones y características principales de los ánodos que compondrán los lechos dispersores serán las siguientes:

- Tipo de ánodo: Ti / MMO
- Vida: 20 años
- Máxima corriente de salida: 4 A
- Sección: 2 x 0,3 cm
- Longitud: 100 cm

### CABLE

Los cables de los ánodos tendrán las siguientes características:

- Conductor de Cobre Recocido
- Aislamiento: KYNAR (PVDF) Fluoruro de Polivinilideno
- Cubierta: HMWPE. Polietileno de Alto Peso Molecular
- Sección: 10 mm<sup>2</sup> ( el general será de 25 mm<sup>2</sup> )

### PRUEBAS Y ENSAYOS

Antes de instalar los ánodos realizar las siguientes comprobaciones:

- Comprobar que la superficie está exenta de escorias o restos de materiales extraños.
  - La morfología no debe haber sido alterada
  - No deben presentar ninguna grieta
  - Su resistencia eléctrica medida entre el ánodo y el extremo libre del cable con que se suministra el mismo no excederá de 0,01 ohm. Esto se determinará haciendo circular una corriente de 10 A.
- De cada colada se tomarán dos muestras para análisis químico, al principio y final de la colada solidificada. Sobre las muestras se realizará un análisis

espectrográfico debiendo estar los resultados dentro de los límites especificados por el fabricante o suministrador.

- El ánodo se suministrará junto con el backfill dentro de un saco textil.
- Las condiciones y resistividad del electrolito donde se sitúan los ánodos se corresponden con el diseño
- No hay pantallas aislantes entre el ánodo y la estructura a proteger
- El ánodo ensacado ha sido completamente impregnado de agua antes del enterramiento
- El circuito eléctrico entre el ánodo y la estructura ha de estar abierto hasta la puesta en servicio

## BACKFILL

El suministrador de los ánodos recomienda coque de petróleo calcinado a alta temperatura, por tener una alta conductividad y un rendimiento uniforme. Las características mínimas del coque de petróleo calcinado serán las siguientes:

- Composición: coque de petróleo calcinado a alta temperatura
- Contenido de carbón: 90 % mínimo
- Granulometría: más del 98 %, de 1 a 3 mm
- Densidad aparente nominal: 1.120 kg/m<sup>3</sup>

---

### 4.3. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE LAS TOMAS DE POTENCIAL

---

#### OBJETO.

La presente especificación tiene por objeto establecer los requisitos técnicos exigibles para el suministro y montaje de las tomas de potencial a instalar a lo largo del gasoducto para el control sistemático del funcionamiento de la protección catódica de la tubería.

#### CARACTERÍSTICAS.

Las tomas de potencial estarán constituidas por los siguientes elementos:

- Caja de toma de potencial en la que se alojan los componentes funcionales de la misma
- Tubo soporte para la sustentación y paso de conductores
- Base de hormigón de fijación al suelo
- Conductores eléctricos y elementos auxiliares.

#### CAJA DE POTENCIAL

Todos los elementos constitutivos de la señalización se pintarán de color amarillo vivo S-0580-Y10R según la Norma UNE 48103-94. En la cara frontal se pegará el logotipo de la empresa propietaria del gasoducto en papel vinilo o similar, resistente a la intemperie.

El espesor de las paredes será tal que los orificios roscados que se practiquen permitan contener al menos cinco hilos de rosca, según normas.

La caja será apta para instalación a la intemperie, grado de protección P-44 (D[N-40050) o IP-559 (UNE-20324).

El cierre se realizará mediante una tapa del mismo material que la caja, que se abatirá mediante pasadores de acero inoxidable, montados sobre las orejeras dispuestas en la propia caja, y que hacen de bisagra. La tapa, por su parte interior, llevará embutida una junta de neopreno de una sola pieza que garantice el sellado, de acuerdo con el grado de protección exigido para la caja.

Las cajas podrán ser de los siguientes tipos:

- Caja de poliéster reforzado con fibra de vidrio ( PRFV ).

Aplicable para las TPE. La composición principal de la caja la formarán dos matrices: la de fibras de refuerzo, que representará el 72%, y la resina y aditivos que representará el 28% restante. La resina será de tipo isoftálico.

Como protección contra la agresión solar, la resina deberá incorporar un filtro U.V.

El composite deberá tener mezclados en la masa pigmentos colorantes con un valor máximo de 8 en la tabla de estabilidad de la luz.

Se aplicará finalmente un revestimiento exterior de pintura según la Norma UNE 48103-94 con una cantidad mínima de 600 g/m<sup>2</sup>.

Tendrá unas dimensiones interiores de 320 x 320 x 150 mm.

- Caja de fundición de aluminio.

La aleación de aluminio usada para la fabricación de esta caja será la AA6063, según la Norma UNE 38337-82. Modelo APLEI serie 500 o similar.

Tendrá las siguientes dimensiones interiores:

TPE: 320 x 320 x 145 mm.

TP : 100 x 200 x 65 mm.

Dispondrá en su interior de cuatro regrueros roscados que no saldrán al exterior, en los que se atornillará la placa de fijación de los componentes.

El cierre se realizará mediante una tapa del mismo material que la caja, que se abatirá mediante pasadores de acero inoxidable, montados sobre orejetas dispuestas en la propia caja y que hacen de bisagra. La tapa llevará embutida por su parte interior una junta de neopreno de una sola pieza que garantizará el sellado, de acuerdo con el grado de protección solicitado para la caja.

El aluminio será lacado con un espesor medio de 60 micras según ISO 2360.

Los tornillos de apertura de la puerta serán triangulares de acero inoxidable M8.

## COMPONENTES INTERIORES DE LA CAJA

En el interior de la caja se alojarán los elementos que a continuación se indican:

Placa de fijación.

En ella se montarán las bornas de fijación de los cables, los descargadores de sobretensión y los accesorios de fijación de los componentes.

Será de celisol, de las siguientes dimensiones:

- Para TPE: 280 x 280 x 5 mm.
- Para TP: 80 x 80 x 5 mm.

Dispondrá de los taladros necesarios para la fijación de los componentes y para su propia fijación a la caja de potencial.

Incorporará carril DIN para el montaje de las bornas de conexión de los cables

Descargadores de sobretensión

Solo es de aplicación para TPE.

El tipo de descargador será de cartucho recambiable y base fija, provisto de tornillo adicional de ajuste regulable entre 0,05 y 0,25 mm y diseñado para fijación a pletina por su parte inferior mediante tornillo y tuerca.

El descargador tendrá las siguientes características:

- Modelo de referencia: Descargador Es Sich 36 con base Es Sich 30 de Siemens, o similar.
- Tensión nominal de descarga: 230 V
- Intensidad nominal de descarga: 20 A
- Tensión de impulsos a 1 kV/μs: ≤ 900 V

- Intensidad nominal de descarga a impulsos ( onda 8/20  $\mu$ s ): 20 kA
- Intensidad nominal alterna de descarga ( 50 Hz, 1 s ) : 40 A
- Resistencia de aislamiento de descarga ( 50 Hz, 1 s ) :  $\geq 10^{10} \Omega$
- Capacidad: 7 pF

#### Tubo soporte.

El tubo soporte deberá ser de aluminio de PRFV. Sujetará la caja de potencial a la cual irá fijado mediante:

- Manguito de acoplamiento roscado, macho-hembra, con reducción para las cajas de aluminio.
- Placa soporte para las cajas de PRFV.

El tubo cumple también la función de paso de los cables que procedentes de la unión con la tubería quedarán embornados en el interior de la caja de potencial.

#### Base de hormigón.

La fijación de la unidad al terreno se conseguirá mediante un dado de hormigón de dimensiones 400 x 400 x 500 mm, en el que quedará embutido el tubo soporte de forma tal que este rebase la cara inferior en algunos milímetros para permitir el paso de cables.

#### MONTAJE DE LA UNIDAD DE TOMA DE POTENCIAL

Se realizará respetando el orden de las operaciones que se indican a continuación:

##### Mecanizado de la caja o envolvente en cajas de aluminio.

Antes de proceder al montaje de los elementos se practicará un taladro roscado en aquella cara lateral de la caja que una vez montada sobre el tubo soporte permita abrir la puerta . Las dimensiones y el roscado serán:

- Para TP:  $\varnothing$  1", rosca cilíndrica de gas con manguito de reducción 1 ½" a 1".
- Para TPE:  $\varnothing$  2", rosca cilíndrica de gas con manguito de reducción 2" a 1 ½".

Las roscas tendrán 5 hilos de paso.

##### Mecanizado de la caja o envolvente en cajas de PRFV.

En la parte inferior se realizarán 4 taladros para el acoplamiento mediante tornillo a la base soporte soldada al tubo.

##### Puesta a tierra de los descargadores de sobretensión.

Los descargadores se conectarán a tierra mediante un cable RV 0,6/1 kV 35 mm<sup>2</sup> de sección, a una pica de acero cobrizada de 19 mm de diámetro y 1 m de longitud que estará enterrada en el terreno en posición vertical.

---

#### 4.4. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE LOS ELECTRODOS DE REFERENCIA

---

Los electrodos de referencia fijos serán de cobre-sulfato de cobre, formado por una hélice de cobre rodeada por 5 kg de sulfato de cobre dentro de un contenedor permeable. El conjunto se meterá dentro de un saco textil, rodeado por 10 kg de bentonita sódica.

Se instalarán a 20 cm de la tubería y se humedecerá previamente el terreno en el que se entierren.

El conductor de unión será de cobre recocido electrolítico, con una resistividad de 1/56 ohm mm<sup>2</sup> / m a 20°C, y aislado con doble capa de PVC. Será flexible y apto para una tensión de servicio de 1000 V ( normas UNE VV 0,6/1 kV ). Podrá emplearse el tipo Sintenax o Plastigrón. Su sección mínima será de 1 x 6 mm<sup>2</sup>.

##### MONTAJE E INSTALACIÓN DE LOS ELECTRODOS DE REFERENCIA Y LAS PROBETAS EN LAS TP

- Establecer la profundidad a la que quedará el extremo inferior del tubo de PVC de Ø 110 mm .
- Realización de la cata en el terreno.
- Desde el nivel del extremo del tubo profundizar otros 40 cm.
- Hacer una selección de tierra del mismo lugar de la excavación, cribarla en grano fino y rellenar con ella los 40 cm excavados debajo de la profundidad del tubo.
- Realizar un agujero de unos 30 cm y rellenarlo con agua.
- Introducir en este agujero el electrodo.
- Instalar un tubo de plástico de Ø 110 mm . Sujetarlo enrasando la pieza roscada superior al nivel de la superficie del hormigón de sujeción y realizar el orificio para el paso de conductores hacia la TP/TPE.
- Instalar un tubo corrugado de protección desde el tubo de Ø 110 mm hasta la parte inferior de la TP/TPE.
- Introducir los cables de desde el tubo del electrodo hasta la caja de la TP/TPE, dejando suficiente longitud de cable en el tubo de PVC.
- Sellar el orificio de entrada de los cables.
- Añadir el hormigón para fijar el tubo de PVC.
- Introducir la probeta en la tierra con unos pequeños golpes para que quede bien incrustada en el terreno.
- Añadir una pequeña cantidad de tierra seleccionada en el interior del tubo de PVC y añadir agua.
- Conectar la banana negra al electrodo y la roja a la probeta.
- En la caja de la TP/TPE, conectar la probeta a la tubería.



---

#### 4.5. ESPECIFICACIÓN PARA EL SISTEMA DE TIERRAS ELÉCTRICAS Y PROTECCIÓN CATÓDICA DE LA POSICIÓN DE EZPERUN

---

En la posición de válvula se instalará una red de puesta a tierra eléctrica, que será independiente del sistema de protección catódica local. Se instalará un descargador de sobretensiones en la sala de control cuya función será unir la red de puesta a tierra y la red de protección catódica local en el caso de producirse una sobretensión eléctrica que pudiera aparecer entre ellas.

Cada sistema ( tierra eléctrica y protección catódica local ) tendrá dos grupos de ánodos, formado cada uno de ellos por tres ánodos de Zinc.

Protección catódica local. En la posición se instalará un sistema de protección catódica local de la tubería enterrada que quede comprendida entre las juntas aislantes de entrada y salida de la posición. Se instalará una red de tierras con cables aislados y ánodos galvánicos de Zinc, que realizarán simultáneamente dos funciones:

- Protección catódica local de los tramos de tubería enterrada
- Puesta a tierra de protección de los elementos aéreos ( tubería y accesorios ) que no estén enterrados y tengan continuidad eléctrica con la tubería enterrada.

Se formará un anillo principal con cable aislado verde-amarillo de  $1 \times 50 \text{ mm}^2$  y los embarrados en arqueta para la conexión de los ánodos. Desde este anillo, mediante soldaduras aluminotérmicas preferentemente, se derivarán conexiones con cable de  $1 \times 35 \text{ mm}^2$  a los elementos de mando y de la propia tubería que emergen a la superficie y que tengan continuidad eléctrica con ella.

Se instalará fuera de las áreas clasificadas un embarrado de tierra en una arqueta por cada conjunto de ánodos. En cada uno de los embarrados se conectarán los cables del conjunto de ánodos, además de los cables de entrada y salida del anillo de tierra. Desde uno de estos embarrados se derivará un cable para conectar con el descargador instalado entre la tierra eléctrica y la protección catódica local. Dicho descargador se montará dentro de una caja eléctrica instalada sobre pared dentro de la sala de control.

Los ánodos de puesta a tierra que suministrarán protección catódica localmente a la tubería estarán formados por al menos dos grupos, compuesto cada uno por tres ánodos de Zinc colocados en extremos opuestos del perímetro del campo de válvulas de la posición.

El valor máximo de la resistencia de puesta a tierra de cada grupo de ánodos será de  $20 \Omega$ .

Los electrodos de la red de puesta a tierra eléctrica y el sistema de protección catódica local estarán separados entre sí para evitar influencias mutuas. La distancia de los ánodos a cualquier tubería enterrada nunca será inferior a 2 m.

Todos los electrodos han de situarse alejados del apoyo del trafo de alimentación eléctrica a la Posición.

Embarrados de puesta a tierra. Se realizarán con pletina de cobre y habrá de dos tipos:

- Instalados sobre pared. Se colocará dentro de la sala de control, en la vertical de la caja del descargador de sobretensiones, para reducir todo lo posible la longitud del cable de conexión entre ambos.
- Instalados en arqueta. Se instalarán en la pared de arquetas prefabricadas de hormigón. Estarán formados por dos pletinas unidas entre sí mediante otra pletina desmontable. A una de las pletinas se conectarán los ánodos o electrodos de tierra, mientras que a la otra se conectará el anillo principal de tierra y las derivaciones de los equipos.

---

#### 4.6. ESPECIFICACIÓN PARA CABLES Y CONEXIONES

---

El cable catódico une la tubería (cátodo) con el polo negativo del transforrectificador, y el cable anódico hace la conexión entre el polo positivo del transforrectificador y el lecho dispersor (ánodo). Dichos conductores serán de cobre recocido según UNE 21117, con envoltorio aislante de P.E. reticulado para 0,6 a 1 kV y cubierta de PVC, tipo RETENAX o similar. ( UNE RV 0,6 / 1 KV ). La sección mínima es de 25 mm<sup>2</sup>, que se aumenta en el caso de que la distancia sea más larga de lo normal, para minimizar la caída de tensión.

Las secciones mínimas a emplear para los diferentes cables serán:

<u>Elemento</u>	<u>sección en mm<sup>2</sup></u>
Tomas de potencial	1 x 6
Anodos y juntas aislantes	1 x 10
Cables anódicos y catódicos	1 x 25
Cables para drenaje	1 x 35
Potencial de referencia	1 x 6

Los conductores irán en zanja a 1 m de profundidad sobre lecho de arena cribada de 10 cm de espesor y cubiertos por otro lecho del mismo espesor. En la zanja se colocará una banda plástica de aviso, terminando el relleno con el material de excavación.

Las conexiones enterradas entre conductores se realizarán mediante soldadura aluminotérmica, protegida por encapsulación en resina, tipo Scotch-Cast. Las conexiones aéreas se protegerán con cinta autovulcanizable.

La soldadura aluminotérmica se realizará sobre una pletina fijada a la tubería mediante soldadura eléctrica y no directamente sobre la pared del tubo, para disipar el calor por una zona más amplia.

Los cartuchos de soldadura para cables de sección entre 25 y 50 mm<sup>2</sup> no debe exceder de 30 gr. Para cables de 6 a 10 mm<sup>2</sup>, los cartuchos serán de 15 grs.

La soldadura cable-acero se protege mediante encapsulación con resina epoxi para cuya realización se emplea un encofrado perdido de anillo de P.V.C. de dimensiones tales que no quede ninguna parte metálica descubierta.

En cuanto a la conexión del cable al ánodo, se aísla del terreno mediante un encapsulado con manguito de polietileno termorretráctil.

---

#### 4.7. CUADRO DE INYECCIÓN DE CORRIENTE (CIPC)

---

Consistirá en una caja o armario de poliéster reforzado con fibra de vidrio con tapa practicable transparente o puerta, en cuyo interior se dispondrán bornes para la concentración y distribución de los cables procedentes de las conexiones a las tuberías, de los electrodos de referencia, de las probetas y de los lechos dispersores.

En su interior se instalará un carril DIN normalizado, con bornes para cada cable procedente de campo. Los cables quedarán identificados mediante etiquetas. Sus medidas serán 30 x 30 x 25 cm, con espacio suficiente para alojar los cables, puentes, elementos reguladores y registrador portátil de corriente y/o tensión.

Se instalarán 2 cuadros CIPC, asociado cada uno a una EPC.

El correspondiente a la EPC1 se instalará en montaje de intemperie sobre basamento de hormigón, junto a la EPC. Recibirá los siguientes cables de campo:

- Cable anódico del lecho 1. 1 x 25 mm<sup>2</sup>
- Cable de inyección de corriente de EPC1 al gasoducto Lumbier – Ezperun. 1 x 25 mm<sup>2</sup>
- Cable del electrodo de referencia instalado junto a la JA-1, desde TPE-1. 1 x 6 mm<sup>2</sup>
- Cable de conexión lado Lumbier de la JA-1, desde TPE-1. 1 x 10 mm<sup>2</sup>
- Cable de conexión lado Ezperun de la JA-1, desde TPE-1. 1 x 10 mm<sup>2</sup>

El correspondiente a la EPC2 se instalará en montaje mural junto a la EPC, dentro de la sala de control de la Posición de Ezperun. Recibirá los siguientes cables de campo:

- Cable anódico del lecho 2. 1 x 25 mm<sup>2</sup>
- Cable de inyección de corriente de EPC al gasoducto Ezperun – Beriain. 1 x 25 mm<sup>2</sup>
- Cable de inyección de corriente de EPC al gasoducto Ezperun – Urroz. 1 x 25 mm<sup>2</sup>
- Cable del electrodo de referencia para el gasoducto Ezperun – Beriain, instalado junto a la JA-3, desde TPE-3. 1 x 6 mm<sup>2</sup>
- Cable de conexión lado Beriain de la JA-3, desde TPE-3. 1 x 10 mm<sup>2</sup>
- Cable de conexión lado Ezperun de la JA-3, desde TPE-3. 1 x 10 mm<sup>2</sup>
- Cable del electrodo de referencia para el gasoducto Ezperun – Urroz, instalado junto a la JA-7, desde TPE-7. 1 x 6 mm<sup>2</sup>
- Cable de conexión lado Urroz de la JA-7, desde TPE-7. 1 x 10 mm<sup>2</sup>
- Cable de conexión lado Ezperun de la JA-7, desde TPE-7. 1 x 10 mm<sup>2</sup>
- Cable de la probeta instalada junto a la JA-2 lado Lumbier, desde TPE-2. 1 x 6 mm<sup>2</sup>
- Cable del electrodo de referencia instalado junto a la JA-2 lado Lumbier, desde TPE-2. 1 x 6 mm<sup>2</sup>
- Cable de conexión lado Lumbier de la JA-2, desde TPE-2. 1 x 10 mm<sup>2</sup>
- Cable de conexión lado Ezperun de la JA-2, desde TPE-2. 1 x 10 mm<sup>2</sup>

---

## 4.8. ESPECIFICACIÓN PARA LA VERIFICACIÓN DEL ESTADO DE LAS PROBETAS

---

### OBJETO

La presente especificación tiene por objeto definir el procedimiento para la verificación del estado de corrosión de las probetas y el registro de la información generada.

### METODOLOGÍA DEL TEST EN PROBETAS

El equipo técnico responsable del trabajo planificará qué probetas han de ser revisadas.

El proceso de verificación será el siguiente:

- Extracción de la probeta de su enterramiento, tirando de ella verticalmente, sin rotación.
- Comprobar si la superficie metálica tiene tierra o alguna formación adherida. Limpiar la superficie metálica con los dedos y con una ligera presión, sin uso de herramienta.
- Comprobar el color y aspecto tanto del metal como de la tierra o formación adheridas.
- Comprobar si hay productos de corrosión y si estos están adheridos al metal.
- Si así se considera, realizar toma de muestra de tierra, formaciones y productos de corrosión para su análisis.
- Si existe corrosión, definir su tipo y grado
- Si se ha producido corrosión y la morfología de la probeta lo permite, realizar medición de la profundidad de la pérdida de material.
- Tomar fotografías de la probeta:
  - o Recién extraída de su enterramiento.
  - o Al eliminar la tierra o formaciones adheridas sin utilizar herramienta.
  - o Al eliminar las formaciones adheridas y los productos de corrosión.
  - o Limpia y cepillada.

Para cada probeta se elaborará un informe que incluirá la ficha de verificación. Se determinará la velocidad de corrosión mediante el siguiente cálculo:

$$V = P \cdot N / 365$$

Siendo V la velocidad de corrosión, en mm / año

P la profundidad de la corrosión, en mm

N los días de enterramiento de la probeta.

Cada probeta tendrá asociada una “Hoja de control de probeta” . El original de esta Hoja será firmada y figurará la fecha de la verificación

### ENTERRAMIENTO DE PROBETAS

El control de la corrosión mediante probetas exige que estas sean enterradas siguiendo el siguiente procedimiento:

- La probeta deberá tener una superficie lisa y limpia. Su color ha de ser gris

homogéneo.

- Antes de introducir la probeta en la arqueta de la toma de potencial comprobar que el terreno de enterramiento no está demasiado duro y seco. Si es el caso, humedecer un poco y remover la tierra justo antes de enterrar la probeta.

- Si en la última extracción de la probeta se comprobó que había formaciones adheridas o alrededor de esta había compuestos desconocidos distintos del terreno natural, antes de introducir de nuevo la probeta deben extraerse los restos de estas formaciones, que probablemente hayan quedado en la tierra de la arqueta.

- Conectar la probeta al cable de toma de potencial de la tubería.

- Medir la intensidad de corriente de protección y comprobar que su valor es normal de acuerdo con el histórico de medidas.

---

## 4.9. PUESTA EN MARCHA

---

La puesta en marcha del sistema se realizará una vez que esté completamente terminado el montaje completo. Se seguirán los pasos siguientes:

### COMPROBACIONES PREVIAS

#### Tubería

- Inspección con el método Pearson de fallos de revestimiento a lo largo de toda la traza del gasoducto.

#### Conexiones eléctricas

- El cable positivo de salida del rectificador está conectado al lecho anódico.
- El cable negativo de salida del rectificador está conectado a la tubería.
- Los cables están claramente identificados mediante etiquetas.
- Los armarios metálicos tienen el chasis conectado a tierra.
- No hay empalmes en el tendido de cables fuera de cajas específicas.
- Comprobación del apriete de las conexiones.

#### Estaciones de Protección Catódica

- Las características eléctricas cumplen con lo requerido en el Proyecto.
- Protección contra contactos eléctricos directos.
- Descargadores de sobretensión de alimentación y salida de c.c.

#### Juntas aislantes

- Medición de la resistencia eléctrica entre los extremos de cada junta aislante para comprobar que no están comunicadas.

#### Varios

- Las arquetas de las probetas y picas están correctamente construidas.
- En la Posición de Ezperun todos los equipos del sistema de protección catódica están ubicados fuera de zonas clasificadas por riesgo derivado del gas.

### PROCESO DE PUESTA EN MARCHA

1. Se dejarán las juntas aislantes JA-4 y JA-5 puenteadas hasta determinar si es necesario instalar resistencias de regulación.
2. Se realizará medición del potencial natural y el de corriente alterna en todas las tomas de potencial.
3. Se dará alimentación eléctrica a las EPCs y se realizará el ajuste inicial del potencial y la corriente de salida con los valores calculados en el Proyecto.

4. Medición de los potenciales en los extremos de la tubería. Se reajustará la inyección de corriente de la EPC hasta obtener en dichos extremos los valores de potencial deseados. La regulación ha de realizarse llevando el potencial a más negativo y no al revés, ya que esto último puede producir una polarización de la tubería que enmascare la regulación de los rectificadores
5. Se realizarán las siguientes mediciones:
  - Probetas. Medición de Eon y registro corto de Eon / Eoff para obtener EIR free
  - Tomas de potencial. Medición de Eon y Uca
  - Registros de Eon y Eoff durante 24 horas con intervalo de medidas de 1 minuto, en probetas de 10 cm<sup>2</sup>, en cruce de ferrocarril y en TP y TPE donde se haya observado en la medición de Eon una variación superior a 1 V.
  - Medición de la corriente de circulación por la tubería
  - Se realizarán y documentarán registros continuos en las EPCs y tomas de potencial dotadas con probeta. En estos registros se realizará medición ON/OFF al menos cada minuto.
6. Medida de los potenciales en todas las tomas de potencial y transcribir los datos a gráficas. Comprobar que en todas las tomas de potencial con probeta el potencial real EIRfree está entre – 0,85 y – 1,1 V con respecto al electrodo de SO<sub>4</sub>Cu/Cu, tal como indica la Norma EN 12954.
7. Registros de potencial durante 24 horas en aquellos puntos donde se prevea la aparición de corrientes vagabundas. Análisis de los registros. Si se encuentran zonas con variaciones del potencial, ver la posibilidad de instalar drenajes unidireccionales, aumentar nº de Estaciones de Protección Catódica o instalar ánodos de sacrificio en puntos intermedios como apoyo a la protección.
8. En los lechos anódicos, realizar medición de la corriente de alimentación.
9. En los tubos de perforación (vainas), se comprobará el correcto aislamiento entre la tubería y el tubo de perforación que la protege. Se medirán los potenciales tanto de la tubería como del tubo de perforación.
10. En el cruce con el ferrocarril, si se confirma la existencia de corrientes vagabundas que afecten al sistema de protección catódica se estudiará si es necesario dejar aislado el tramo de cruce entre las dos juntas aislantes e instalar una EPC para la protección de ese tramo. En caso de aislar el tramo de cruce, asegurarse de que se da continuidad eléctrica y con ello protección catódica al tramo de gasoducto que queda aguas abajo del cruce.
11. En la Posición de Ezperun se medirán los potenciales y las corrientes de circulación por cada grupo de ánodos de protección catódica local.
12. Una vez ajustado el sistema realizar informe con todas las medidas, registros e indicación del estado final de las juntas aislantes: .abiertas, puenteadas o con regulación de corriente.



## DOCUMENTACIÓN

Finalizada la verificación de la efectividad de la protección catódica se entregará a la propiedad del gasoducto la documentación final, que incluirá:

- Descripción de las instalaciones con características de los equipos.
- Modificaciones efectuadas respecto al proyecto original.
- Esquema lineal de implantación, en el que se reflejará la ubicación de la tubería y todos los elementos relacionados con la protección catódica: tomas de potencial, juntas aislantes con su estado final, probetas, lechos de ánodos, recorridos de cables, EPCs, tubos de perforación, electrodos de referencia permanentes, redes de puesta a tierra, etc, así como las estructuras cercanas que puedan influir en la protección catódica: cruce de ferrocarril y líneas eléctricas, incluyendo los valores medidos de resistividad del terreno. Todo el trazado estará referenciado al pk del gasoducto.
- Registros de mediciones de los potenciales.
- Gráfico del valor del potencial, tanto natural Eon como EIRfreea lo largo de todo el trazado y en todos los elementos.
- Gráfico del valor de la corriente: salida del rectificador, circulación por la tubería y entrada desde probetas y picas de puesta a tierra en la posición de Ezperun.
- Documentación y recomendaciones para la operación y mantenimiento del sistema de protección catódica. Se incluirán catálogos de los equipos.

## REQUISITOS DE GARANTÍA DE CALIDAD Y MEDIOAMBIENTALES

El contratista deberá disponer de un Sistema de Garantía de Calidad que cumpla con la Norma UNE-EN-ISO-9001 ( 2008 ).

Asimismo deberá disponer de los equipos de medida adecuados, que como mínimo serán:

- Polímetros y registradores con posibilidad de medir simultáneamente el potencial ON, OFF, Uca y corriente por la probeta ( Ica, Icc )
- Telurómetros para la medición de la resistencia del terreno
- Pinzas amperimétricas de corriente continua y alterna.

El contratista que ejecute los trabajos en campo deberá elaborar un Plan de Gestión Ambiental para el desarrollo de su actividad, en el que se tendrá en cuenta:

- Gestión de residuos: restos de envases y embalajes, pinturas, aceites, etc.
- Elaboración de los Programas de Puntos de Inspección para controlar y documentar el cumplimiento del Plan.
- A igualdad de prestaciones se emplearán los productos más inocuos para las personas y el medio ambiente. En donde sea posible se utilizarán productos biodegradables.

---

#### 4.10. CONTROL Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

---

Ha de prestarse atención al cambio de la resistividad de los terrenos debido a las condiciones meteorológicas, las modificaciones que pueden producirse en instalaciones del entorno o el envejecimiento del revestimiento del tubo.

Una vez que la tubería está polarizada no se esperan grandes variaciones del potencial y bastan las medidas del potencial instantáneo. Si se producen fuertes y rápidas variaciones se debe pensar que son producidas por corrientes parásitas. Cuando se sospeche de su existencia se han de realizar registros del potencial de una duración mínima de 24 horas en aquellos lugares en principio más susceptibles de verse afectados por este tipo de corrientes, como son los cruces y aproximaciones a vías de ferrocarril electrificado, líneas eléctricas,...

El objetivo es mantener todos los puntos de la estructura a lo largo del tiempo con un potencial suficiente para inhibir la corrosión. Es necesario realizar unas comprobaciones periódicas y unos registros que certifiquen que la tubería está siendo bien mantenida.

Dado que nos estamos refiriendo a tuberías enterradas solo podemos realizar medidas de potencial en aquellos puntos en los que el tubo sale a la superficie y donde tenemos conductores soldados a la estructura.

En principio, si la Estación de Protección Catódica funciona bien es de esperar que la estructura se encuentre protegida en todo su recorrido. Se considera que el potencial no sufre grandes variaciones a lo largo de la tubería, con lo que no es necesario realizar mediciones en puntos próximos.

Se evalúa la efectividad del sistema comparando los valores medidos con los de referencia, tomados en el momento de la puesta en servicio y años siguientes o con los criterios de protección.

Es importante el control del estado del revestimiento aislante, dada la influencia que tiene sobre el potencial de la tubería.

#### DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL

Para comprobar que una conducción tal como un gasoducto, oleoducto, etc se encuentra en condiciones operativas óptimas se realiza inspección con pistón inteligente, que consiste en introducir en la tubería un aparato dotado de palpadores que miden el espesor de la pared del tubo en cada punto y la distancia que van recorriendo y lo registran para su posterior análisis. Este método no obliga a interrumpir el servicio.

#### REVESTIMIENTO

##### Control del revestimiento antes de enterrar la tubería

Una vez realizado el revestimiento y previo al enterramiento de la tubería es necesario realizar los siguientes controles de calidad:

- Barrido eléctrico. En el control previo al enterramiento del tubo se emplean unos aparatos llamados Chispómetros, compuestos por un generador de alta tensión ( 10 ÷25

KV ) y muy baja intensidad, uno de cuyos polos se conecta a tierra mediante un cable desnudo y el otro a un muelle que forma un anillo que rodea a la tubería y se le desplaza a lo largo del conducto. Se realiza una conexión a tierra de la parte metálica de la tubería que se va a inspeccionar. A continuación se recorre la tubería empujando el anillo y cuando este pasa sobre una zona que tiene fallo de revestimiento saltan chispas que indican donde se encuentra el defecto. Estos aparatos incorporan alarma acústica y óptica que avisan cuando detectan algún desperfecto.

Cuando se verifican aislamientos de alta calidad, como polietileno extruido, se aplican tensiones de 25 KV y velocidades de desplazamiento del anillo  $10 \div 15$  metros/minuto. Para manguitos termorretráctiles se emplean 15 KV y si el revestimiento es de calidad inferior ( bandas aplicadas en frío ) se utilizan 10 KV / mm de espesor de banda.

- Comprobación de la adherencia. Se corta un cuadrado de 10 x10 cm de revestimiento y se verifica que la adherencia está entre 4 y 20 N/cm

El buen estado del revestimiento es fundamental para la eficacia de la protección catódica y la calidad del aislamiento empeora con el paso del tiempo, lo que obliga a inyectar una cantidad de corriente mayor para poder mantener el nivel de protección.

El control del revestimiento aislante se ha de realizar tanto en la fase previa al enterramiento de la tubería como posteriormente, durante la vida operativa de la instalación.

### Control del revestimiento con la tubería enterrada

Como mínimo cada dos años se debe realizar una inspección para comprobar la ausencia de defectos en el aislamiento, que pueden producirse por el envejecimiento del revestimiento, presiones del terreno, piedras, deslizamientos, daños al enterrar otros servicios, ...

La propia evolución en el tiempo del potencial y densidad de corriente necesaria para obtenerlo indican si el revestimiento aislante está deteriorado. Existen varios procedimientos para la detección y localización de los defectos de aislamiento, que están basados en el establecimiento de una diferencia de potencial entre la tubería y el terreno, de forma que si existe un fallo en el revestimiento, al disminuir la resistencia eléctrica en ese punto, se puede detectar un aumento de la densidad de corriente.

El método más empleado es el llamado PEARSON. Se crea una diferencia de potencial entre el terreno y la tubería conectando un generador con una frecuencia de aproximadamente 1 Khz, entre el tubo ( en una toma de potencial ) y una pica de tierra. En la superficie, dos operarios controlan la diferencia de potencial del suelo de la siguiente manera: uno de ellos porta un medidor de potencial, con indicación de la medida y auriculares para detectar una señal acústica. Caminan sobre la traza de la tubería separados unos ocho metros. Calzan botas con clavos para asegurar un buen contacto con tierra y un conductor eléctrico lleva al aparato medidor el potencial de las botas.

Durante todo el recorrido, el operario que lleva los auriculares escucha una señal cuya intensidad sonora a ajustado, que indica que se está inyectando una señal eléctrica al tubo. Cuando el primer operador pasa sobre un fallo del revestimiento, el medidor detecta la ddp producida por la salida de corriente al terreno, siguen avanzando y baja la intensidad de la señal sonora, pero vuelve a aumentar cuando el segundo operador camina sobre el defecto de aislamiento. En este momento se puede pensar que en ese

punto existe un fallo en el revestimiento, pero dado que puede darse el caso de que la señal la produzca otra conducción ajena, lo adecuado es instalar un contacto de tierra como referencia en el punto en el que el medidor nos ha indicado el fallo y realizar un recorrido circular haciendo tierra con el otro contacto con un radio de unos ocho metros. Si la señal sonora se mantiene constante hay que pensar que realmente en ese punto hay defecto de revestimiento. Si no es constante, el efecto puede ser producido por otro conducto.

## PERIODICIDAD DE LAS MEDIDAS DE POTENCIAL

Es necesario medir el potencial en los cambios de estación climática, sobre todo al pasar de época seca a húmeda y viceversa, debido a la gran influencia de la humedad sobre la resistividad de los terrenos. Esto puede llevar a realizar ajustes en los parámetros de inyección de las Estaciones de Protección Catódica para ajustarse a esos cambios.

Cuando se realicen visitas a una toma de potencial para tomar medidas se realizará inspección visual de todo los elementos que la constituyen, tales como obra civil, anclaje, caja de conexiones, bornes, descargadores de sobretensiones, ... )

## MEDIDA DE POTENCIAL EN JUNTAS AISLANTES Y TOMAS DE POTENCIAL

- Comprobar si la junta aislante está abierta, puenteada o regulada mediante diodos, resistencias o una combinación de estos.
- La medida del potencial se realizará con electrodo de Cu/SO<sub>4</sub>Cu. Si dispone de electrodo de referencia fijo se utilizará preferiblemente este.
- Si se emplea electrodo de referencia portátil este se colocará en la vertical de la tubería enterrada, humedeciendo previamente el terreno.
- En el caso de que haya variaciones en el potencial medido se anotarán los valores máximo, mínimo y medio.
- En juntas aislantes medir los potenciales a ambos lados de la junta aislante.
- Si el valor del potencial instantáneo medido ha sido en algún momento más positivo de - 850 mV destacarlo como anomalía
- Cuando en la toma de potencial existe la toma de un respiradero de vaina de protección se medirá el potencial de esta para comprobar si está comunicada.
- Realizar también medidas de potencial de corriente alterna. En este caso, cuando los potenciales medidos sean iguales o superiores a 5Vca, se deberá realizar registros continuo de potencial de 24 horas de duración.

## CLASIFICACIÓN DE ELEMENTOS.

Previo a la planificación de los mantenimientos se realizará la siguiente clasificación:

- Tomas de potencial preferentes: para las medidas de control que posteriormente han de realizarse, en el gasoducto proyectado serán tomas de potencial preferentes todas las TPEs y las TP dotadas con un electrodo de referencia y una probeta de acero al carbono con una superficie desnuda de 10 cm<sup>2</sup>.

- Tomas de potencial simples: en esta clasificación estarán el resto de tomas de potencial.

#### CONTROL Y MEDIDAS EN TOMAS DE POTENCIAL

- Periódicamente se realizará medida de potencial según el procedimiento. Periódicamente se realizarán registros continuos de 24 horas. Según el tipo de toma:

- En tomas de potencial preferentes: en la probeta, registro del potencial ON/OFF y registro de corriente.

- En las EPC: potencial  $E_{ON}$  y corriente de salida

- Periódicamente, en las tomas de potencial preferentes:

- Medir la intensidad de corriente de entrada a la probeta y el potencial respecto al electrodo de referencia. Tomar la medida cuando esta se haya estabilizado.

- Realizar medida del potencial de corriente alterna.

- Periódicamente se realizará una medida de potencial en las tomas de potencial ubicadas en los campos de válvulas de la Posición de Ezperun.

#### CONTROL Y MEDIDAS EN ESTACIONES DE PROTECCIÓN CATÓDICA

- Comprobar que es correcto el modo de funcionamiento MANUAL o AUTOMÁTICO

- Comprobar que son correctos los ajustes de la regulación principal e intensidad mínima. Lectura de ajustes.

- Lectura de la tensión de salida tubo-lecho dispersor

- Lectura de la intensidad de inyección

- Lectura del potencial tubo-suelo en el punto de inyección.

- Verificar que los valores de potencial de la tubería, corriente suministrada y modo de funcionamiento están acordes con los del último control efectuado.

- Comprobar el estado de los descargadores de sobretensiones.

- Indicar la resistencia del lecho de ánodos, calculada a partir de la corriente y tensión de salida.  $R = V_{sal} - \text{potencial} + 0,5/I_{sal}$ .

#### MANTENIMIENTO DEL RECTIFICADOR DE PROTECCIÓN CATÓDICA

- Antes de realizar operaciones que conlleven riesgo eléctrico se quitará la tensión de alimentación.

- Comprobar el estado general del armario, anclajes y elementos de obra civil.

- Comprobar conexiones y aislamiento de la humedad. Aplicar liquido antihumedad.

Renovar sales desecantes.

- Limpieza de todos los elementos

- Comprobar el estado de las protecciones eléctricas: fusibles, interruptores magnetotérmicos, diferenciales y descargadores de sobretensiones.

- Medida del valor de la resistencia a tierra de protección.

- Contrastar las lecturas de los equipos de medición del panel con las de un equipo patrón portátil, ajustando si es necesario.

- Contrastar la lectura del electrodo fijo con la de uno portátil a situar sobre la vertical de la tubería

- Comprobar los modos de funcionamiento manual y automático y los elementos de regulación. Se variarán los dispositivos de regulación, tanto en manual como en automático, observando que los valores de corriente y potencial varían de manera consecuente con las distintas regulaciones.

- Si el equipo tiene regulación de corriente mínima, establecimiento y medida del valor de dicha corriente. Para ello, fijar al mínimo la regulación principal y con el dispositivo de regulación de la corriente mínima ajustado al valor establecido medir la corriente de salida. Anotar el valor del ajuste y el valor de dicha corriente. Volver a fijar la regulación principal al valor que corresponda.

- Comprobar la conexión a tierra del armario.

## JUNTAS AISLANTES

Dado que periódicamente se han de realizar medidas de los potenciales a ambos lados de la junta aislante, en el caso de que se produzca fallo de aislamiento en dicha junta se apreciará al medir los potenciales, dado que estos serán iguales o muy similares debido a la poca resistencia que puede oponer dicho fallo de aislamiento. Sin embargo, una junta aislante parcialmente defectuosa puede no detectarse simplemente con la medición de los potenciales a ambos lados de la junta, dado que en este caso pueden ser diferentes.

Otro método para comprobar la falta de aislamiento de una junta aislante es realizar una medición de su resistencia. Se ha de realizar con medidor de corriente alterna, dado que los medidores de corriente continua sufren perturbaciones debido a los efectos de la polarización. De todas formas el obtener una medida de resistencia baja tampoco asegura que la junta esté correcta, debido a la gran variedad de factores que influyen en la resistencia.

Las técnicas más eficaces son aquellas en las que se emplea la corriente:

- Se aplica una corriente en uno de los lados de la junta aislante y se comprueba si el potencial en el otro lado de la junta varía. Si no hay variación o cambia en sentido opuesto la junta aislante está correcta.

- Se mide la corriente a través de un puente entre los dos extremos de la junta. Si no se produce circulación de corriente la junta es defectuosa. Con este método tampoco se puede descartar totalmente el que la junta sea parcialmente defectuosa, ya que la corriente puede circular a través suya.

## TOMAS DE POTENCIAL SIMPLES Y ESPECIALES

- En las que tengan asociado un electrodo de referencia o un electrodo-probeta fijos, contrastar la lectura tomada con el electrodo fijo con la realizada con otro portátil situado sobre la vertical de la tubería.

- Revisión general. Sustituir las partes dañadas.

- Comprobar el estado de la junta de cierre de la tapa y la estanqueidad del paso de conductores. Sellar si es necesario.

- Comprobar el estado de los descargadores de sobretensión y de los elementos de regulación.

- Comprobar conexiones y aislamiento de la humedad. Aplicar líquido antihumedad. Renovar sales desecantes.

- Limpieza de todos los elementos

## MEDIDAS DEL LECHO ANODICO

- Medir la resistencia del lecho. Previamente se debe quitar la alimentación eléctrica del rectificador y desconectar el cable anódico de las bornas del rectificador.
- Si el terreno está seco verter agua para humectar el área de enterramiento del lecho dispersor y así disminuir su resistencia.
- Medir la magnitud y sentido de la corriente eléctrica del lecho. De esta manera se puede saber con qué densidad de corriente trabaja y hacer una estimación de la vida de los ánodos.

## ANODOS DE PUESTA A TIERRA

- Revisar los conectores y cables.
- Medición de la resistencia a tierra mediante telurómetro, realizando la medida de cada ánodo independiente, de la estructura desconectada de la puesta a tierra y del conjunto conectado.
- Medición del potencial natural de cada ánodo, cuando son de zinc.
- Reapretado de los tornillos y bornas de conexión.

## TUBOS DE PERFORACIÓN ( VAINAS )

Se detecta fácilmente la existencia de anomalías simplemente midiendo los potenciales de la vaina y del tubo.

## PROTECCIÓN PASIVA DE LA POSICIÓN DE EZPERUN

Realizar periódicamente inspección visual del estado de la protección pasiva de todas las tuberías aéreas, poniendo especial atención en las zonas de transición tierra/aire, en las zonas susceptibles de acumular humedad y en los apoyos de las tuberías.

## DESCARGADORES DE SOBRETENSIONES

Se deben mantener limpias y asegurar la continuidad eléctrica de las patillas de los descargadores con el soporte a través del que deben drenar las descargas

## REGISTROS GRÁFICOS

Resulta fundamental el disponer de unos gráficos del comportamiento del potencial de la tubería e incluso del voltaje e intensidad suministrados por las EPC para poder analizar los datos, descubrir anomalías y solucionarlas. También es interesante tener constancia escrita de si la tubería ha quedado sin protección durante algún tiempo.



## PROGRAMACIÓN DE LOS REGISTRADORES PARA REALIZAR REGISTROS ON/OFF DE 24 HORAS

Para realizar registros en las probetas:

- Se programarán dos canales. El primero registrará el potencial de la probeta y el segundo el potencial de conexión  $E_{ON}$  de la tubería.
- El intervalo de medición será de 1 segundo, en ambos canales.
- Los canales registrarán valores instantáneos, no promedios.
- La duración del registro será de 24 horas.
- Se interrumpirá cíclicamente la corriente en la probeta. El tiempo OFF de desconexión de la probeta será de 1,10 segundos.

El intervalo de tiempo entre dos periodos OFF consecutivos será de un minuto.

Para realizar registros en las EPCs:

- Se programarán dos canales. El primero registrará el potencial de referencia de la tubería y el segundo la intensidad de la corriente de salida. Dado que el canal lee voltaje esta corriente se medirá indirectamente, sobre el shunt del equipo ( mV ). Las lecturas finalmente reflejadas serán en amperios.
- El intervalo de medición será de 2 segundos, en ambos canales.
- Los canales registrarán valores instantáneos, no promedios.
- La duración del registro será de 24 horas.

### Registros de corriente en las probetas

Se trata de medir la corriente continua de la probeta en unas condiciones que sirvan de referencia para medidas y evaluaciones posteriores.

La magnitud de la corriente que entra en la probeta desde el suelo depende del potencial existente en cada momento, ya que las condiciones del entorno no varían durante la realización de las medidas.

Se dice que existen influencias cuando el potencial de conexión  $E_{ON}$  registrado tiene una amplitud mayor que 1 V.

Teniendo en cuenta esto, la programación y realización de los registros de corriente será:

- Se utilizará un multímetro registrador de precisión de verdadero valor eficaz para la medición de corriente continua en un rango de microamperios. La medición se realizará conectando el equipo en serie con el circuito tubería-probeta.
- Se programará un canal para registrar la corriente continua en sentido de entrada en la probeta como sentido positivo.
- El intervalo de medición será de un segundo.
- La duración del registro será de cinco minutos si no hay influencias y treinta minutos si las hay.

### Registros de detalle ON/OFF en las probetas

- Se programará un canal de medida, para registrar el potencial de la probeta.
- El intervalo de medición será de una décima de segundo.
- Se registrarán valores instantáneos, no promedios.



- Se interrumpirá cíclicamente la corriente en la probeta. El tiempo OFF de desconexión de la probeta será de un segundo. El intervalo de tiempo entre dos OFF consecutivos será de un minuto.
- La duración del registro será como mínimo de una hora.

### Registros de 24 horas de potencial de corriente alterna

La programación será la siguiente:

- Se utilizará un multímetro registrador de precisión de verdadero valor eficaz para la medición de corriente alterna. La medición se realizará con el equipo en rango manual.
- Se registrará el potencial de la tubería ( probeta si existe ) y el electrodo de referencia.
- El intervalo de medición será de una medida cada diez segundos.

### Registros de 24 horas de intensidad de corriente alterna en la probeta

Se trata de medir la corriente alterna en una probeta de acero de 1 cm<sup>2</sup> de superficie desnuda, para el posterior análisis del riesgo de corrosión existente.

La magnitud de la corriente que es conducida o inducida en la probeta depende del potencial existente en cada momento y que principalmente viene determinado por las condiciones de régimen de la fuente afectante, como puede ser una línea aérea eléctrica de alta tensión. .

Según esto, la programación de los registros será:

- Se utilizará un multímetro registrador de precisión de verdadero valor eficaz para la medición de corriente alterna en un rango de miliamperios. La medición se realizará conectando el equipo en serie con el circuito tubería-probeta.
- El intervalo de medición será de diez segundos.
- La duración del registro será de 24 horas.

## ANÁLISIS DE LOS REGISTROS

### Análisis de los potenciales de protección catódica

El control de los potenciales sin caída de tensión IR en la tubería es la base del mantenimiento preventivo del sistema de protección catódica contra la corrosión. Dada la importancia de los registros continuos de potencial ON/OFF de 24 horas de duración, antes de transcurridos 15 días desde su realización se hará una evaluación de los resultados.

El objetivo de esta evaluación es determinar el porcentaje de tiempo que el potencial sin IR de la probeta está más positivo que el potencial de protección.

Para determinar si el nivel de protección catódica es correcto se calculará la media aritmética y el número de veces que el potencial sin IR es más positivo que el nivel de protección. Se deberá cumplir que:

$$-1,10 \text{ V} < E_{\text{IR free}} (\text{valor medio}) \leq E_p$$

y además

( nº de veces que  $E_{IR\ free} > E_p$  ) < 5 % del total de los intervalos OFF registrados.

Si los resultados muestran un tiempo fuera de protección mayor del 5 % se han de realizar cambios en la regulación de los equipos y en la alineación de las juntas aislantes, junto con la realización de registros continuos y medidas de corriente en probetas, hasta conseguir que los niveles de protección sean los adecuados.

Si la conclusión fuera que con el sistema instalado no es posible cumplir los criterios expuestos anteriormente se hará necesaria la realización de una propuesta que determine las acciones que se requieren para la ejecución de nuevas instalaciones.

### Análisis de los potenciales de corriente alterna

Cuando los potenciales de corriente alterna sean iguales o superiores a 5 V eficaces rms se deberán realizar registros continuos con el siguiente criterio:

- Registros de 24 horas de potencial Vca para comprobar los niveles de tensión a lo largo de un día completo.
- En aquellas tomas de potencial en las que el potencial registrado supere los 5,5 Vca se realizarán registros de 24 horas de la corriente a través de probetas enterradas. Las probetas para esta aplicación han de ser de 1 cm<sup>2</sup> de superficie. La densidad de corriente se calcula con el valor de corriente medida y esa superficie de probeta.
- El valor de la densidad de corriente nos indica el riesgo de corrosión del metal según el siguiente criterio:

- entre 30 y 80 A/m<sup>2</sup>, existe riesgo de corrosión
- mayor de 80 A/m<sup>2</sup>, corrosión prácticamente segura.

Si se obtienen valores de densidad superiores a 80 A/m<sup>2</sup> deben tomarse medidas para conocer si existen fallos de revestimiento y se realizarán catas para detectar la existencia o no de corrosión causada por la corriente alterna.

Si se estuviera en el nivel de entre 30 y 80 A/m<sup>2</sup> deberán establecerse medidas de mitigación de corriente alterna de la zona de afección, e incluso se abrirán catas para la reparación de fallos de revestimiento y la evaluación de las corrosiones existentes.

### INFORME DEL ESTADO DEL SISTEMA DE PROTECCION

Tendrá los siguientes apartados detallados:

- Título del informe y periodo de mantenimiento al que corresponde.
- Representación y descripción esquemática de las alineaciones de los tramos de tubería con los elementos del sistema.
- Descripción de nuevas instalaciones que entran a formar parte del sistema de protección catódica o que pudieran llegar a ejercer influencia sobre él.
- Descripción cronológica de las mediciones y actuaciones realizadas. Descripción de los cambios de regulación de los potenciales de referencia y corriente en la EPCs.
- Descripción del punto de regulación de cada EPC con sus magnitudes de funcionamiento: tensión, intensidad, potencial de referencia, regulación principal y resistencia del lecho anódico.
- Enumeración de los registros de potencial ON/FF tanto de 24 horas como de detalle realizados.
- Representación gráfica, informe de resultados, informe de análisis básico e informe de evaluación de detalle de los resultados obtenidos en los registros ON/OFF efectuados. Descripción del cumplimiento o no de los criterios de protección según los análisis efectuados.

- Cálculo y representación gráfica por cada tramo de tubería de los niveles de densidad de corriente de protección con las medidas de corriente en las probetas y de los niveles de potencial de conexión  $E_{ON}$  medios de la tubería y registrados en estas mismas tomas de potencial preferentes.
- Como conclusión se realizará una descripción general del estado del sistema de protección catódica y se especificará si existe necesidad de incorporar algún elemento activo o de control nuevo al sistema.

## FACTORES QUE PUEDEN PERJUDICAR EL CORRECTO FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Los principales factores que pueden afectar al correcto funcionamiento de la protección catódica son:

- Tormentas eléctricas. Pueden provocar el disparo de las protecciones de la alimentación eléctrica de los rectificadores o incluso dañarlos. Si el sistema no está dotado de telecontrol pueden pasar días antes de que se detecte y solucione el problema.
- Variaciones en el tráfico y tamaño de los servicios afectantes (vías de FF.CC., líneas eléctricas, ...) que traen consigo variaciones de las corrientes parásitas.
- Corrientes telúricas. En periodos climáticos calurosos y secos y sobre todo en terrenos graníticos, las corrientes telúricas generadas por el campo magnético terrestre provocan variaciones del potencial cuya compensación requiere el reajuste de los parámetros de funcionamiento de las Estaciones de Protección Catódica.
- Tubos de perforación. Las vainas son tubos por los que se introduce la tubería para darle protección mecánica en cruces de ríos, líneas de ferrocarril,... y además se utilizan para detectar y canalizar posibles fugas del fluido transportado por la tubería y poder sustituir esta en caso de necesidad sin afectar al tráfico de trenes. Pueden tener un impacto muy perjudicial en el sistema de protección catódica de las tuberías. Su uso se debe evitar en lo posible.

Pueden ser de acero o de hormigón. Las de acero tienen la ventaja de que puede comprobarse si están en contacto con el tubo, pero un inconveniente es que si ese contacto se produce puede provocar corrosión en la tubería.

Las vainas dan problemas al sistema de protección catódica dado que en su interior el tubo no queda protegido católicamente, ya que no existe electrólito y no se puede inspeccionar su estado. Este exige que el control de su instalación durante la obra sea exhaustivo. Se ha de prestar atención a los siguientes puntos:

- Aislamiento perfecto entre vaina y tubo.
- Correcto centrado de la tubería dentro de la vaina mediante separadores aislantes.
- Los cierres de los extremos de la vaina han de ser estancos para evitar la entrada de agua.
- Toma de potencial en la vaina para poder comprobar el aislamiento entre aquella y la tubería.

Los problemas pueden deberse a las siguientes situaciones:

- Continuidad eléctrica entre la vaina y la tubería debido a que en aquella se ha introducido agua o barro.
- Polarización de la vaina

## FRECUENCIAS DE REALIZACIÓN DE LOS MANTENIMIENTOS Y REVISIONES DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

La frecuencia mínima de realización de los trabajos de revisión y mantenimiento de los equipos que componen el sistema de Protección Catódica, según la Norma UNE 12954 y la práctica de las empresas mantenedoras de este tipo de sistemas es:

TAREA	FRECUENCIA	TIPO DE TAREA
Protección pasiva. Revestimientos.	Semestral	Mantenimiento
Medida de potencial de TP simple	Anual	Inspección
Registros en TP preferentes y EPCs	Semestral	Mantenimiento
Medida de corriente alterna en TP preferentes	Semestral	Mantenimiento
Medida de potencial en el campo de válvulas de la Posición de Ezperun	Trimestral	Inspección
Control de funcionamiento de EPCs	2 semanas	Inspección
Análisis de resultados y elaboración de informe	Semestral	Mantenimiento
Mantenimiento de los elementos del sistema de protección catódica	Semestral	Mantenimiento
Anodos galvánicos	Anual	Inspección
Sistemas de puesta a tierra	Anual	Inspección
Dispositivos de seguridad y protección	Anual	Inspección
Verificación del estado de las probetas	Anual	Mantenimiento

Estas frecuencias son las de mínimas y en el Plan de Mantenimiento general ha de tenerse en cuenta el realizar medidas de potencial en alguna de las TP simples todos los meses por zonas de forma que se chequee continuamente el correcto funcionamiento de las Estaciones de Protección Catódica.

### DETECCIÓN DE AVERÍAS.

En general, las averías en un sistema de protección catódica llevan a un aumento de la resistencia del circuito, con la consiguiente disminución de la intensidad inyectada o la elevación del voltaje de salida. Naturalmente, al bajar la corriente de salida el potencial de protección se verá afectado.

La mayor parte de las averías con las que podemos encontrarnos se deben a las siguientes causas:

- Salto de las protecciones eléctricas debido a tormentas y sobretensiones. Más que una avería se trata de un evento que deja al sistema fuera de servicio hasta que se acuda a rearmar los dispositivos. Si se instalan interruptores diferenciales y magnetotérmicos de rearme automático se pueden evitar muchos problemas de este tipo.

En el caso de disponer de telemedida o telemando la resolución del problema puede ser inmediata.

- Agotamiento de los ánodos o discontinuidad de los conductores.- disminuye o

deja de inyectarse corriente a la estructura.

Los ánodos se pueden pasivar o consumirse.

Los conductores pueden perder la continuidad debido a la corrosión, dado que son anódicos y un fallo de su aislamiento supone su rápida destrucción.

También sufren esfuerzos mecánicos debido a compactaciones del terreno.

• **Avería del rectificador.**- Dado que los rectificadores ( EPCs ) no disponen de partes móviles y normalmente funcionan con corrientes reducidas, su mantenimiento es muy sencillo y su vida útil muy larga. A continuación se muestra una serie de síntomas y causas probables

SINTOMA	CAUSA PROBABLE
Voltaje de salida al máximo y no hay salida de corriente	Fusible de salida fundido. Circuito de salida abierto ( cables, conexiones,... )
Intensidad de salida al máximo y voltaje de salida al mínimo	Cortocircuito entre positivo y negativo. Puente rectificador averiado
Voltaje e intensidad de salida más bajos de lo habitual	Anodos deteriorados. Falla una parte del puente rectificador. Tarjeta de regulación averiada
Voltaje de referencia a cero. Intensidad de salida al máximo	Electrodo de referencia deteriorado. Tarjeta de regulación averiada
Alarma de potencial bajo con voltaje y corriente de salida a cero	Función ON/OFF activada. Tarjeta de regulación averiada
Al conectar el electrodo de referencia la tensión de referencia disminuye	Electrodo de referencia averiado. Tarjeta de regulación averiada
El interruptor magnetotérmico salta y no puede rearmarse	Tiristores cortocircuitados. Tarjeta averiada o mal ajustada. Transformador de potencia deteriorado
No hay regulación	Puente de tiristores averiado. Tarjeta de regulación averiada. ON/OFF en bloqueo

A continuación se muestran varios ejemplos de registros realizados durante el año 2014 en un gasoducto.

En este primer registro, de 19 horas de duración, puede verse el comportamiento del potencial e intensidad de inyección de una EPC.

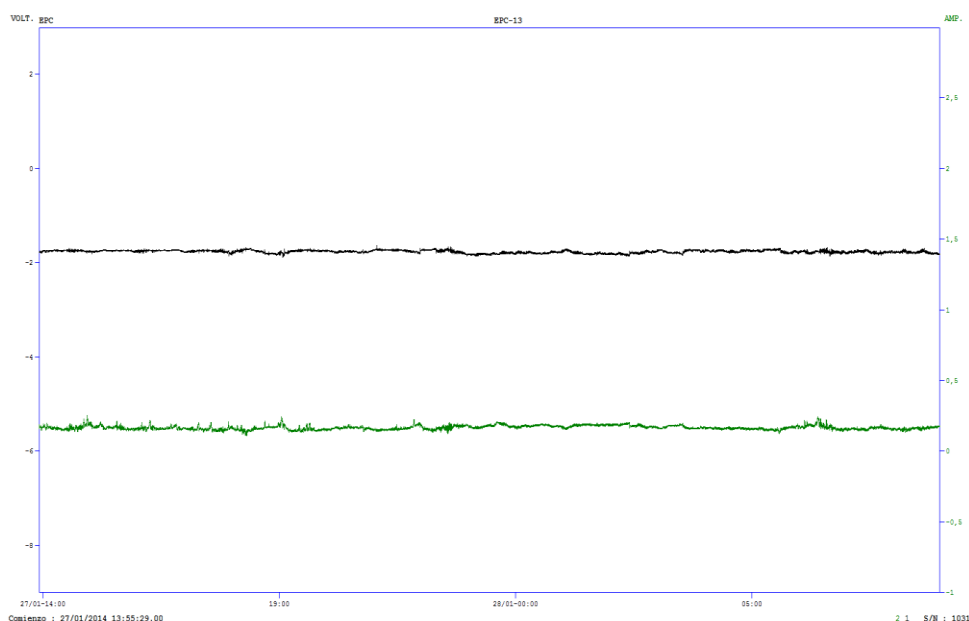
En él pueden analizarse los valores máximos, mínimos y promedio.

```

Nombre de registro      : EPC
N° dispositivo          : 1031
Intervalo medicion      : 00:00:01.00
Comienzo Fecha/Hora    : 27/01/2014 13:55:29.00
Final Fecha/Hora       : 28/01/2014 8:58:46.32
N° Input                :          3          4
Funcion                 :          POTENCIAL      INTENSID.
Unitades                :          VOLT.         AMP.
Minimo                  :          -1,89000      0,110000
Maximo                  :          -1,63000      0,255000
Promedio                :          -1,75889      0,168581
Desv. cuad. media      :          0,030155      0,014440
Umbral bajo             :          ****         ****
Trans. umbral bajo     :          ****         ****
% tiempo trans.        :          ****         ****
Umbral alto            :          ****         ****
Trans. umbral alto     :          ****         ****
% tiempo trans.        :          ****         ****
Numeros de medidas     :          68598        68597
Tipo med.(int. reg)    :          Valor (1)    Valor (1)
Factor escala           :          1           100
Offset                  :          0           0
  
```

POTENCIAL (NEGRO)

INTENSIDAD DE INYECCION (VERDE)

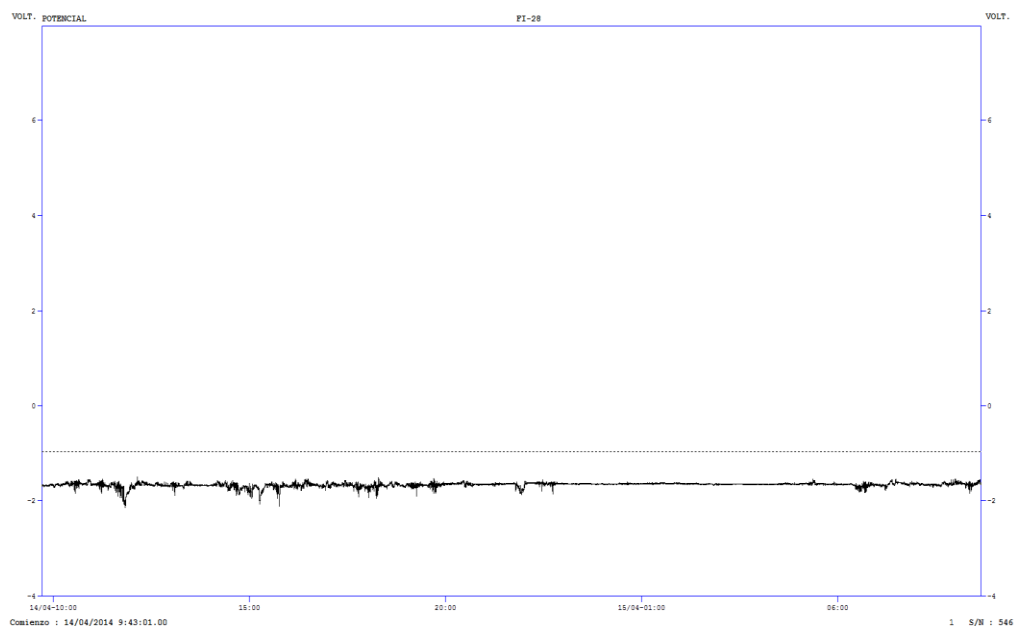


El siguiente registro es la medida del potencial ON en una toma de potencial simple ( TP )

Nombre de registro : POTENCIAL

N° dispositivo : 546  
Intervalo medicion : 00:00:01.00  
Comienzo Fecha/Hora : 14/04/2014 9:43:01.00  
Final Fecha/Hora : 15/04/2014 9:41:55.40  
N° Input : 4  
Funcion : GASODUCTO  
Unitades : VOLT.  
Minimo : -2,14000  
Maximo : -1,49000  
Promedio : -1,65530  
Desv. cuad. media : 0,047270  
Umbral bajo : \*\*\*\*  
Trans. umbral bajo : \*\*\*\*  
% tiempo trans. : \*\*\*\*  
Umbral alto : -0,95000  
Trans. umbral alto : 000:00:00:00  
% tiempo trans. : 0,000000  
Numeros de medidas : 86335  
Tipo med.(int. reg) : Valor (1)  
Factor escala : 1  
Offset : 0

**MEDICION: GASODUCTO (NEGRO)**



## Registro de los potenciales a ambos lados de una junta aislante, tomados en una toma de potencial especial ( TPE )

Nombre de registro : Potenciales a ambos lados de una junta aislante abierta

N° dispositivo : 751

Intervalo medicion : 00:00:01.00

Comienzo Fecha/Hora : 11/04/2014 12:14:38.00

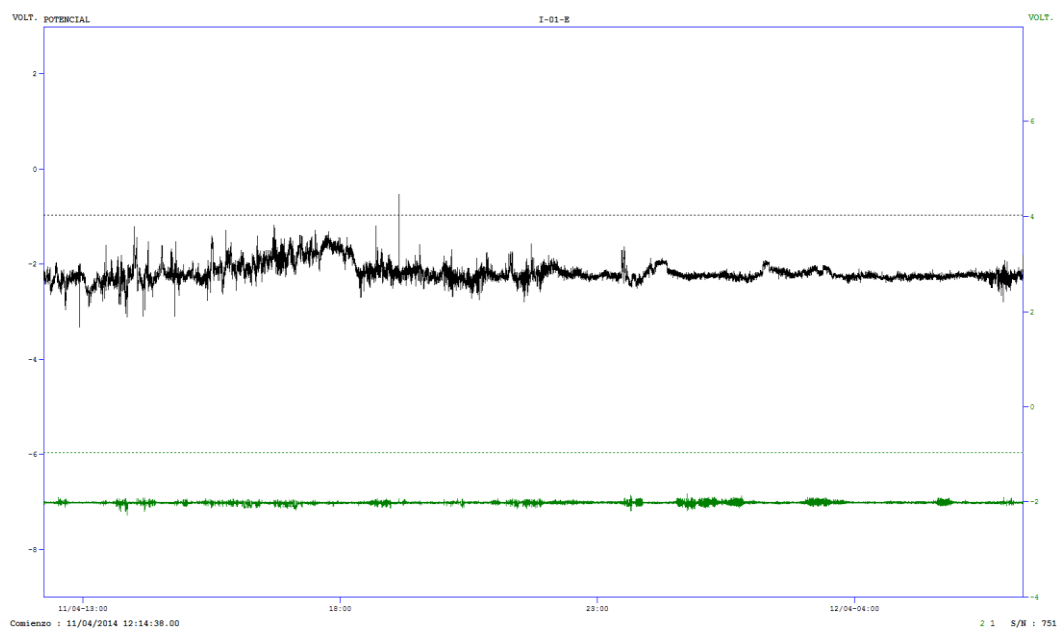
Final Fecha/Hora : 12/04/2014 7:17:55.32

N°Input	3	4
Funcion	Aguas arriba	Aguas abajo
Unitades	VOLT.	VOLT.
Minimo	-3,31000	-2,27500
Maximo	-0,53000	-1,82500
Promedio	-2,17285	-2,01010
Desv. cuad. media	0,191952	0,019546
Umbral bajo	****	****
Trans. umbral bajo	****	****
% tiempo trans.	****	****
Umbral alto	-0,95000	-0,95000
Trans. umbral alto	000:00:00:01	000:00:00:00
% tiempo trans.	0,001457	0,000000
Numeros de medidas	68598	68597
Tipo med.(int. reg)	Valor (1)	Valor (1)
Factor escala	1	1
Offset	0	0

### POTENCIALES A AMBOS LADOS DE UNA JUNTA AISLANTE ABIERTA

A. ARRIBA: NEGRO

A. ABAJO: VERDE



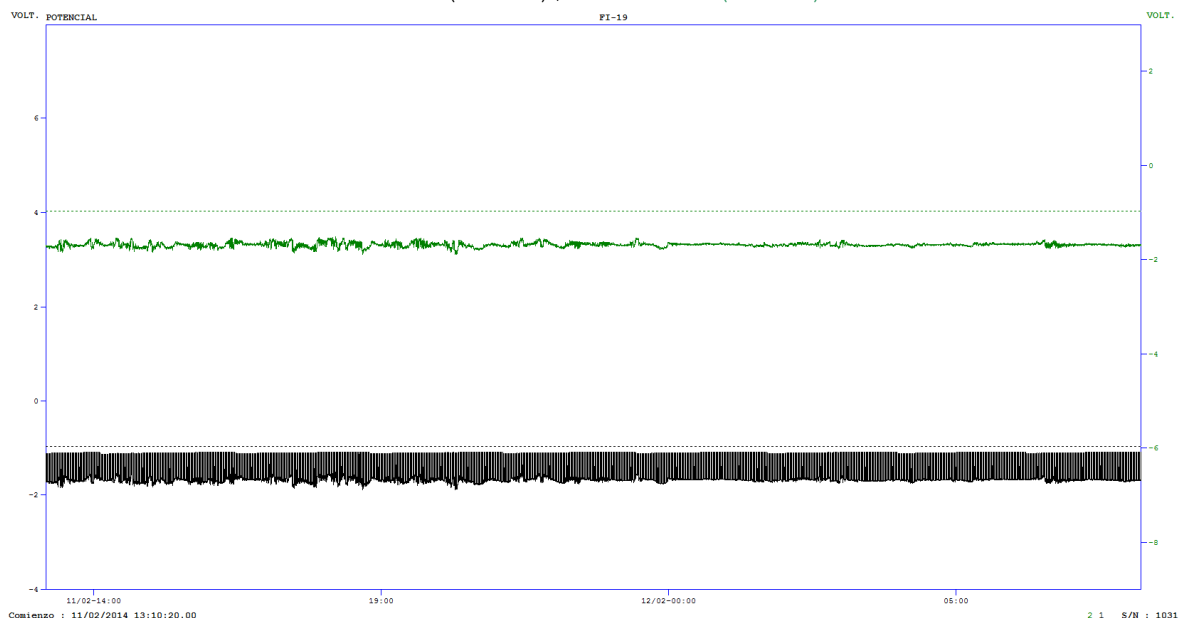
Puede verse cómo el potencial del lado aguas arriba se han aproximado al nivel de transgresión de - 3 V e incluso un pico lo ha sobrepasado.



Registro del potencial en una probeta y en el gasoducto. Se aprecian las variaciones del potencial en la probeta cuando se abre el circuito de protección para ver el potencial de polarización de la tubería

Nombre de registro	:	POTENCIAL	
Posicion	:	FI-19	
N° dispositivo	:	1031	
Intervalo medicion	:	00:00:01.00	
Comienzo Fecha/Hora	:	11/02/2014 13:10:20.00	
Final Fecha/Hora	:	12/02/2014 8:13:37.32	
N°Input	:	3	4
Funcion	:	PROBETA	GASODUCTO
Unitades	:	VOLT.	VOLT.
Minimo	:	-1,88000	-1,88000
Maximo	:	-1,07500	-1,51000
Promedio	:	-1,66263	-1,67360
Desv. cuad. media	:	0,087794	0,042933
Umbral bajo	:	****	****
Trans. umbral bajo	:	****	****
% tiempo trans.	:	****	****
Umbral alto	:	-0,95000	-0,95000
Trans. umbral alto	:	000:00:00:00	000:00:00:00
% tiempo trans.	:	0,000000	0,000000
Numeros de medidas	:	68598	68597
Tipo med.(int. reg)	:	Valor (1)	Valor (1)
Factor escala	:	1	1
Offset	:	0	0

MEDICIONES: PROBETA (NEGRO) /GASODUCTO (VERDE)



Pamplona, 31 de agosto del 2.014

Carlos Ramírez Ballabriga

## DOCUMENTO 5 . PRESUPUESTO

## ALCANCE DEL TRABAJO DE INSTALACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

El contratista del montaje y puesta en marcha del sistema de Protección Catódica del Gasoducto Lumbier – Ezperun – Urroz deberá realizar, sin carácter limitativo, los siguientes trabajos:

- Replanteo del trazado de los cables y la ubicación de las cajas, armarios y tomas de potencial.
- Suministro y montaje de las dos Estaciones de Protección Catódica definidas en el presente proyecto.
- Suministro y montaje de los dos lechos anódicos, incluyendo el backfill.
- Suministro y montaje de 3 electrodos de referencia fijos para las EPCs.
- Suministro e instalación de dos cajas de inyección de corriente.
- Suministro e instalación de 22 tomas de potencial simples.
- Suministro e instalación de 9 conjuntos de electrodos de referencia fijos extraíbles y 9 probetas de 10 cm<sup>2</sup>, con arqueta y tubo de PVC.
- Suministro e instalación de 9 tomas de potencial especiales.
- Suministro e instalación de 5 tejas de acero al carbono para tubo de Ø 20" para conexión de los puntos de inyección y de las tomas de potencial.
- Suministro e instalación de 14 tejas de acero al carbono para tubo de Ø 14" para conexión de los puntos de inyección y de las tomas de potencial.
- Suministro e instalación bajo tubo de todos los cables eléctricos, incluyendo la excavación y tapado de las zanjas.
- Medición de los potenciales naturales de toda la instalación, identificando los puntos con influencias externas.
- Puesta en marcha de las Estaciones de Protección Catódica, ajustando los parámetros de funcionamiento para alcanzar la protección de todo el gasoducto.
- Medición de los potenciales ON en los puntos significativos.
- Registro continuo durante 24 horas de los potenciales ON y OFF en los puntos conflictivos.
- Medir los potenciales OFF en todas las tomas de potencial en las que no se realice registro del potencial.
- Emisión de un informe de la puesta en marcha provisional y de la puesta en marcha final de la obra detallando los trabajos realizados, los potenciales medidos y adjuntando los registros de potencial, así como los planos finales de obra y situación de las conexiones de las juntas aislantes.
- Entrega de los Certificados de los materiales y Manuales de los equipos.

El suministro de las juntas aislantes queda fuera del alcance de este Presupuesto, ya que corresponde a la empresa constructora del gasoducto. Se trata de 2 juntas aislantes de Ø 20" ANSI 600 y 6 juntas aislantes de Ø 14" ANSI 600.

## Capítulo 1. Materiales y equipos, excepto Posición de Ezperun

Nº de orden	Concepto/Referencia	Cantidad	Precio Unitario ( € )	Total ( € )
1	Rectificador monofásico 220 Vca, marca Marvic, modelo RMA 50 Hz, con salida 10 A / 30 V y regulación manual-automática	2 ud	3.125,0	6.250,0
2	Anodo Ti-MMo en pletina de 20 x 3 x 1000 mm, con 3 m de cable 1 x 10 mm <sup>2</sup> KYNAR/HMWPE	5 ud	121,24	606,2
3	Coque de petróleo calcinado granular	2.216 kg	0,64	1.418,24
4	Electrodo de referencia permanente cerámico de Cu/SO <sub>4</sub> Cu con 60 m de cable 1 x 6 mm <sup>2</sup>	3 ud	120,47	361,41
5	Soldadura aluminotérmica y empalme epoxi en "Y" conexión ánodos	3 ud	21,54	64,62
6	Soldadura aluminotérmica y empalme epoxi en "T" conexión derivaciones ánodos Zn Posición Ezperun	7 ud	21,54	178,78
7	Cable 1 x 25 mm <sup>2</sup> RV-k 06/1 kV para lecho anódico e inyección corriente	491 m	3,54	1.738,14
8	Cable 1 x 10 mm <sup>2</sup> RV-k 06/1 kV	81 m	1,47	119,07
9	Cable 1 x 6 mm <sup>2</sup> RV-k 06/1 kV	366 m	0,94	344,04
10	Probeta 10 cm <sup>2</sup> + tubo PVC + registro	9 Ud	114,62	1.031,58
11	Teja curvada de acero al carbono para tubo de Ø 20". Medidas 100 x 100 x 5 mm	5 Ud	12,24	61,2
12	Teja curvada de acero al carbono para tubo de Ø 14". Medidas 100 x 100 x 5 mm	14 Ud	12,24	171,36
13	Teja curvada de acero al carbono para tubo de Ø 20". Medidas 50 x 50 x 5 mm	13 Ud	8,53	100,89
14	Teja curvada de acero al carbono para tubo de Ø 14". Medidas 50 x 50 x 5 mm	9 Ud	8,53	76,77

15	Caja de toma de potencial de 100 x 100 mm, en aleación de Al, IP-65, con cierre mediante tornillos de cabeza triangular. Color gris. Placa de montaje con rail para bornas. Entrada 1" NPT en lado inferior. Acoplamiento 1 ½ " y tubo soporte de 1,2 m de longitud, de acero galvanizado de Ø = 1 ½	22 Ud	125,00	2.750,00
16	Caja de toma de potencial de 320 x 320 mm, en aleación de Al, IP-65, con cierre mediante tornillos de cabeza triangular. Color gris. Placa de montaje con rail para bornas. Entrada 1" NPT en lado inferior. Acoplamiento 1 ½ " y tubo soporte de 2 m de longitud, de acero galvanizado de Ø = 1 ½ ".	9 Ud	275,00	2.475,00
17	Electrodo de referencia de Cu/CuSO <sub>4</sub>	9 Ud	132,25	1.190,25
18	Pica de acero cobrizado con grapa de conexión	8 Ud	25,15	201,2
19	Tubo corrugado de doble capa M-20	50 m	0,40	20,00
20	Basamento de hormigón para soporte de la EPC1 y cuadro CIPC	1 Ud	850,00	850,00
21	Estructura en acero galvanizado para soporte de la EPC2 y cuadro CIPC	1 Ud	325,00	325,00
22	Pequeño material accesorio de fijación y marcado de cables, terminales, encintados, etiquetas con marcado indeleble,...	1 Ud	100,00	100,00

## Capítulo 2. Montaje de equipos

Nº de orden	Concepto/Referencia	Cantidad	Precio Unitario ( € )	Total ( € )
23	Partida alzada para el montaje del lecho anódico 1, incluyendo mano de obra, maquinaria y pequeño material	Partida alzada		2.450,00
24	Partida alzada para el montaje del lecho anódico 2, incluyendo mano de obra, maquinaria y pequeño material	Partida alzada		2.380,00
25	Partida alzada para el montaje de las dos Estaciones de Protección Catódica y cuadros de inyección de corriente CIPC según	Partida alzada		1.200,00

	Especificación, incluyendo estructuras de soporte y cableado entre cuadros, bajo tubo.			
26	Instalación y conexión de los cables anódicos, catódicos, electrodos de referencia y probeta hasta las dos EPCs, incluyendo excavación de zanja, tendido de los cables bajo tubo y soldaduras aluminotérmicas, según Especificaciones.	Partida alzada		6.800,00
27	Montaje de toma de potencial simple incluyendo: excavación, soldadura por puntos de teja de acero a la tubería, soldadura aluminotérmica del cable a la teja, tendido del cable hasta la caja y conexión, restitución del terreno. Según plano D-05	18 Ud	820,00	14.760,00
28	Montaje del conjunto toma de potencial simple, electrodo de referencia y probeta, incluyendo: excavación, soldadura por puntos de teja de acero a la tubería, soldadura aluminotérmica del cable a la teja, tendido del cable hasta la caja y conexión, restitución del terreno. Según plano D-05	3 Ud	910,00	2.730,00
29	Montaje de toma de potencial simple en el cruce con el Canal de Navarra según plano C-01, incluyendo: : excavación, soldadura por puntos de teja de acero a la tubería, soldaduras aluminotérmicas de los cables a la teja y al tubo de perforación , tendido de los cables hasta la caja y conexión, restitución del terreno.	1 Ud	860,00	860,00
30	Montaje del conjunto toma de potencial especial, electrodo de referencia y pica de tierra de acero cobrizado, incluyendo: excavación, soldaduras por puntos de tejas de acero a la tubería, soldadura aluminotérmica de los cables a las tejas, tendido de los cable hasta la caja y conexión, restitución del terreno. Según plano D-07	3 Ud	1.150,0	3.450,00
31	Montaje del conjunto toma de potencial especial, electrodo de referencia, probeta y pica de tierra de acero cobrizado, incluyendo: excavación, soldaduras por puntos de tejas de acero a la tubería, soldadura aluminotérmica de los cables a las tejas,	5 Ud	1.300,0	6.500,00

	tendido de los cable hasta la caja y conexión, restitución del terreno. Según plano D-08			
--	--	--	--	--

### Capítulo 3 Replanteo, pruebas, ajustes e informes

Nº de orden	Concepto/Referencia	Cantidad	Precio Unitario ( € )	Total ( € )
32	Replanteo previo de los trabajos a realizar para determinar su alcance según las Especificaciones.	Partida alzada		300,00
33	Medición de los potenciales naturales con respecto al electrodo de Cu/CuSO <sub>4</sub> en todas las tomas de potencial	Partida alzada		900,00
34	Medición de los potenciales ON con respecto al electrodo de Cu/CuSO <sub>4</sub> en todas las tomas de potencial	Partida alzada		900,00
35	Registros de potencial ON/OFF de 3 minutos según Norma EN 13509	Partida alzada		1.500,00
36	Registros de potencial ON/OFF de 2 horas según Norma EN 13509 en tomas de potencial con influencias externas	Partida alzada		600,00
37	Registro de potencial ON/OFF de 24 horas en los puntos que sufran influencias externas.	Partida alzada		900,00
38	Puesta en marcha provisional del sistema de protección catódica realizando energizado de los equipos, medición de potenciales ON/OFF en las tomas de potencial y emisión del informe correspondiente	Partida alzada		1.800,00
39	Puesta en marcha final del sistema de protección catódica realizando comprobación de potencial y corriente de las EPCs, medición de potenciales ON/OFF en todas las tomas de potencial y emisión del informe final de obra incluyendo los planos definitivos.	Partida alzada		2.500,00

Capítulo 4 . Protección Catódica local en la Posición de Ezperun

Nº de orden	Concepto/Referencia	Cantidad	Precio Unitario ( € )	Total ( € )
40	Suministro de picas ( ánodos ) de Zn de 35 x 35 x 1500 mm dispuestas en interior de saco de tela relleno con backfill en base bentonítica y con 4 m de cable de 1 x 35 mm <sup>2</sup> , tipo RV 0,6/0,75 Kv, funda verde-amarillo. Incluye tubo corrugado de doble capa M-25 para parte enterrada del cable	6 Ud	140,00	840,00
41	Arqueta circular en poliéster, Ø 200 x 500 mm, con tapa con símbolo de puesta a tierra, tipo AC-CP ( una para cada ánodo de Zn )	6 Ud	76,00	456,00
42	Arqueta rectangular de poliéster 500 x 300 mm con tapa con símbolo de puesta a tierra, tipo AC-CP, con embarrado para conexión de picas	2 Ud	140,00	280,00
43	Cable 1 x 50 mm <sup>2</sup> RV-k 06/0,75 kV verde-amarillo para anillo red	120 m	7,26	871,20
44	Cable 1 x 35 mm <sup>2</sup> RV-k 06/0,75 kV verde-amarillo para derivaciones red	57 m	4,69	267,33
45	Pequeño material accesorio de fijación y marcado de cables	1 Ud	40,00	40,00
46	Partida de obra civil de instalación y conexión de picas, arquetas y cables, con realización de zanjas y restitución del terreno	1 Ud	4.225,00	4.225,00



Capítulo 1 . Materiales de línea según mediciones.....	20.433,75 €
Capítulo 2. Montaje de materiales y equipos .....	41.130,00 €
Capítulo 3 . Puesta en marcha, regulación e informe final .....	9.400,00 €
Capítulo 4. Protección Catódica local en Posición Ezperun .....	6.979,00 €
<hr/>	
Total capítulos .....	77.942,75 €
21 % IVA .....	16.367,98 €
<hr/>	
Presupuesto total .....	94.310,73 €

El total del presupuesto asciende a la cantidad de noventa y cuatro mil trescientos once euros.

Pamplona, 31 de agosto del 2.014

Carlos Ramírez Ballabriga

#### PLAZO DE EJECUCIÓN DE LAS OBRAS

La duración estimada para la ejecución total de las obras del presente proyecto es de 1 mes a partir del fax de adjudicación de los trabajos.

En un plazo máximo de un mes desde la fecha de recepción del fax de adjudicación se deberá firmar el acta de inicio de las obras.

## DOCUMENTO 6 . BIBLIOGRAFIA

- PROTECCIÓN CATÓDICA.  
INSTITUTO ESPAÑOL DE CORROSIÓN Y PROTECCIÓN  
M Angel Guillén
- UHLIG'S CORROSION HANDBOOK. Second Edition  
R. Winston Revie. Editorial: John Wiley & sons
- PEABODY'S CONTROL OF PIPELINE CORROSION. Second Edition  
NACE International. The corrosion society
- CORROSION Y PROTECCION METALICAS. Vol II  
Coordinadores: S. Feliu y M. Andrade. Consejo Superior de  
Investigaciones científicas
- CATHODIC PROTECTION OF PIPELINES  
Branko N. Popov / Swaminatha P. Kumaraguru  
Center for Electrochemical Engineering. University of South Carolina
- PROTECCIÓN CATÓDICA  
F. Martínez Lozano.  
Empresa ENAGAS
- PROTECCION CONTRA LA CORROSION  
Empresa Gas NATURAL
- Norma UNE-EN 50162 Enero 2005  
Protección contra la corrosión debida a corrientes vagabundas  
provenientes de sistemas de corriente continua.
- Norma UNE-EN 50122-2 Julio 2011  
Aplicaciones ferroviarias.  
Medidas de protección contra los efectos de las corrientes vagabundas  
producidas por los sistemas de tracción de corriente continua
- Informe UNE/CENT/TS 15280 IN Febrero 2007  
Evaluación del riesgo de corrosión por corriente alterna de las tuberías  
enterradas.  
Aplicación a las tuberías protegidas catódicamente
- Norma UNE-EN 12954 Febrero 2002  
Protección catódica de estructuras metálicas enterradas o sumergidas  
Principios generales y aplicación para tuberías

- Norma UNE-EN 13509 Diciembre 2003  
Técnicas de medida en protección catódica
- Norma UNE-EN 12068 Abril 1999  
Protección catódica  
Recubrimientos orgánicos exteriores para la protección contra la corrosión de tubos de acero enterrados o sumergidos, empleados en conjunción con la protección catódica.  
Cintas y materiales retráctiles

Relación de extractos de catálogos utilizados ( se adjuntan )

- Manual y esquemas eléctricos del rectificador ( EPC) marca MARVIC modelo RMA, seleccionado en el Proyecto.
- Picas de Zinc ensacadas
- Anodos para corriente impuesta
- Cajas de toma de potencial
- Juntas aislantes monolíticas ( monoblock )
- Electrodo de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub> portátil
- Coque de petróleo calcinado ( backfill )
- Teja con soldadura aluminotérmica
- Picas de puesta a tierra

Pamplona, 31 de agosto del 2.014

Carlos Ramírez Ballabriga